Die Aufteilung einer Sortenproduktion auf mehrere Werke mit festem Standort

Walter Fischer

1971

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546001_0040

DIE AUFTEILUNG EINER SORTENPRODUKTION AUF MEHRERE WERKE MIT FESTEM STANDORT

Inaugural-Dissertation

Zur Erlangung der Doktorwürde
einer Hohen Staatswirtschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität
zu München

vorgelegt
von
Walter Fischer
1971

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Referent: Prof. Dr. F. Hanssmann
Korreferent: Prof. Dr. E. Heinen
Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juli 1971

Inhaltsübersicht

1 Darstellung und Abgrenzung des untersuchten Problems 1

2 Die Erfassung möglicher Problemstrukturen in einem Entscheidungsmodell 7

21 Entscheidungskriterien 7
211 Gewinn oder Kosten als Entscheidungskriterium 8
212 Sonstige Kriterien 9

22 Entscheidungsabhängige Kostenarten 9
221 Distributionskosten der Fertigprodukte 9
222 Abbaufähige Kapazitätskosten 20
223 Sortenwechselkosten 23
224 Steuern 28
225 Die Preise der Produktionsfaktoren 32

3 Formulierung und Lösung eines gemischt-ganzzahligen Modells 39

31 Ein gemischt-ganzzahliges Modell als Zusammenfassung wichtiger Teilaspekte 39

32 Wege zum Auffinden einer "guten" Lösung eines Modells mit der beschriebenen Struktur 41
321 Exakte Lösungsverfahren 41
322 Heuristische Verfahren 42

4 Entwicklung des Entscheidungsmodells für einen konkreten Fall 44

41 Beschreibung des Unternehmens 44

42 Die Problemstruktur, der Entscheidungszeitraum und das Entscheidungskriterium 45

43 Die in das Modell aufzunehmenden Sachverhalte 50
431 Die Grenzen des Entscheidungsfeldes 51
432 Die zu berücksichtigenden Kostenarten 52

4321 Materialbeschaffungskosten 53
4322 Transportkosten der Fertigprodukte 54
4323 Kapazitätskosten 55
4324 Gewerbesteuer 57
4325 Sortenwechselkosten 57
4326 Kosten sonstiger Produktionsfaktoren 62

44 Das Entscheidungsmodell 63
441 Die Definition der Entscheidungsvariablen 63
4411 Kennzeichnung der Werksproduktion 64
4412 Kennzeichnung des Werk-zu-Werk-Transports 67
4413 Kennzeichnung des Werk-zu-Kunden-Transports 68
442 Strukturierung der Umwelt 70
4421 Die Nachfrage 70
4422 Die Lieferkapazitäten der Werke 72
4423 Die Produktionskapazitäten der Werke 73
443 Strukturierung der Zielfunktion und zugehöriger Nebenbedingungen 76
4431 Werk-zu-Kunden-Transport 76
4432 Werk-zu-Werk-Transport 76
4433 Kosten der im Rahmen der Entscheidung variablen Kapazitäten 77
4434 Lohnkosten 78
444 Zusammenfassung der Modellteile 79

5 Datenbeschaffung und -aufbereitung 80

51 Der Rohrabsatz 80

52 Kostenparameter 83
521 Die Transportkostenkoeffizienten für den Werk-zu-Kunden-Transport 83
5211 Der Bahnwaggonversand 83
5212 Der Bahnstückgutversand 84
5213 Der LKW-Versand 84
522 Der Werk-zu-Werk-Transport 86
523 Die Kosten variabler Kapazitäten 87
524 Variable Lohnkosten 88

53 Sonstige technische Parameter 89
531 Parameter zur Beschreibung der Lagerkapazität der Werke 89
532 Parameter zur Beschreibung der Produktionskapazität der Werke 90
533 Kapazitäten und Produktionskoeffizienten entscheidungsabhängiger Kapazitätskosten 91

6 Modellauswertung 92

61 Das Optimierungsproblem 92

62 Entwicklung eines Grobmodells 93

63 Auswertung des Grobmodells 97

64 Auswertung des ursprünglichen Modells 109

65 Sensitivitätsanalyse 117

66 Beurteilung der Ergebnisse der Fallstudie 126

7 Zusammenfassung, insbesondere der wichtigeren Ergebnisse 129

Literaturverzeichnis 135

1 DARSTELLUNG UND ABGRENZUNG DES UNTERSUCHTEN PROBLEMS

Das der Arbeit zugrunde liegende Problem läßt sich grob wie folgt charakterisieren:

Gegeben sei ein Fertigungsunternehmen, das über mehrere, räumlich weit voneinander entfernte Werke verfügt. Mehrere Produkte sollen in einer Sortenfertigung hergestellt werden, wobei der voraussichtliche Bedarf für jedes Produkt und seine geographische Verteilung als Prognosen vorliegen. Die Kapazität der Werke ist in beschränktem Umfang flexibel, so daß die Produktionsprogramme der einzelnen Werke geändert werden können. Die gestellte Frage ist, wie die Produktion "günstig" auf die vorhandenen Werke verteilt werden sollte.

Den Kern der Arbeit bildet eine Fallstudie (Abschnitt 4 bis 6), die für ein Unternehmen der kunststoffverarbeitenden Industrie durchgeführt wurde und die daher auf eine spezielle Entscheidungssituation bezogen ist. Diese Entscheidungssituation führt zu einer Problemstruktur, die sicher über den Einzelfall hinaus Bedeutung hat, die aber andererseits zu einer strafferen Abgrenzung der Problemstellung zwingt. Brauchbar sind die im folgenden entwickelten Modellansätze nur insoweit, als der Gesichtspunkt der Systemorientierung eingehalten ist, d.h. insoweit als das Problem weit genug und differenziert genug formuliert ist, um alle wesentlichen, von einander abhängigen Komponenten zu erfassen.[1)]

Zwei Aspekte sind hier zu nennen:

1. Das entwickelte Modell ist statisch. Problematisch ist eine statische Betrachtung dann, wenn realisierte Produktionsverteilungen die in Zukunft realisierbaren

---

1) Ackoff, L.A., Rivett, E.R., Industrielle Unternehmensforschung, Wien, München, 1966, S.20 ff.

Produktionsverteilungen beeinflussen. Eine solche Abhängigkeit ist aber meist gegeben

a) aus technischen Gründen

Wird z.B. eine auf ein Produkt hin spezialisierte Anlage in einem Werk installiert und kann die Anlage nicht von einem Werk in ein anderes umgestellt werden, so ist die Zahl der möglichen Produktionsverteilungen für die Lebensdauer der Anlage beschränkt. Produktionsumverteilungen sind im Extremfall nur im Rahmen von Investitionsentscheidungen möglich.

b) aus Kostengründen

Selbst wenn die Anlage umgestellt werden kann, werden vorteilhafte Produktionsumverteilungen gehemmt, wenn die Umstellungskosten relativ zu den durch die Umstellung erreichbaren Kosteneinsparungen hoch sind. Dabei ist zu bedenken, daß die Umstellungskosten zeitpunkt-, die als Folge der Umstellung erreichbaren Kosteneinsparungen aber zeitraumbezogen sind. Je länger der Optimierungszeitraum gewählt wird, umso weniger fallen solche Umstellungskosten ins Gewicht.

In beiden Fällen ist eine längerfristige Betrachtung notwendig. Bei langfristiger Betrachtung tritt neben dem Problem zunehmender Unsicherheit bei der Vorhersage einer weit in der Zukunft liegenden Umwelt das Problem auf, inwieweit die im Zeitablauf eingetretene Umweltänderung im Modell berücksichtigt werden muß. Nur beim Zusammentreffen einer sich langsam ändernden Umwelt mit – relativ zu den in diesem Zeitraum erzielbaren Kosteneinsparungen – vernachlässigbar kleinen Systemumstellungskosten können statische Modelle in der Weise hintereinander geschaltet werden, daß man praktisch von einem sogenannten Optimalzustand ohne längeren Übergangsprozeß zum nächsten springt.

Für eine sehr langfristige Betrachtung bei einer sich stetig ändernden Umwelt kann ein statisches Modell lediglich zur Ermittlung eines guten Endzustandes nützlich sein. Ein Beispiel für die Bestimmung eines langfristig wünschenswerten Zustandes ist die französische Ölstudie, die bei HANSSMANN beschrieben wird.[1] Eine Aussage über einen guten Weg, der zu diesem Endzustand führen soll, läßt sich jedoch nur mit Hilfe eines dynamischen Modellansatzes treffen.

Eine dynamische Formulierung ist insbesondere dann notwendig, wenn Produktionsverteilungen im Entscheidungszeitraum mehrmals einer sich unregelmäßig ändernden Umwelt angepaßt werden sollen. Beispiele für dynamische Ansätze sind beschrieben bei CULHANE, RONALDSON und ZIMMERMANN[2], GUPTA, ROSENHEAD[3], HESPOS, STRASSMANN[4] und MAGEE[5]. Zur Lösung werden in der Literatur Entscheidungsbaumverfahren vorgeschlagen.

---

1) HANSSMANN, F., Operations Research Techniques for Capital Investment, New York, London, Sidney, 1968, S.37 ff., besonders S.41.

2) CULHANE, J.H., RONALDSON, A.M., ZIMMERMANN, R.M., A Dynamic Approach to Capital Investment – A Case Study, in: Proceedings of the Fourth IFORS Conference, Boston 1966, S.551 ff.

3) GUPTA, S.K., ROSENHEAD, J., Robustness in Sequential Investment Decisions, in: Management Science, Vol.15, No.2, October 1968, S.18-29.

4) HESPOS, D.B., STRASSMANN, P.A., Stochastic Decision Trees for the Analysis of Investment Decision, in: Management Science, Vol.11, No.10, August 1965, S.244-259.

5) MAGEE, J.F., Industrial Logistics, New York usw., 1968 S.290 ff.

Statische Modelle können bestenfalls Bausteine dynamischer Modelle sein. Wenn ein Entscheidungsbaum zur Beschreibung eines dynamischen Sachverhalts benutzt wird, interpretiert man die Knoten des Baumes meist als Systemzustände. Zum Beispiel könnten Maschinenausstattungen der einzelnen Werke, die in den verschiedenen Teilperioden realisierbar sind, die Systemzustände bilden.[1] Für jede Teilperiode wird eine statische Umweltsituation unterstellt. Mit Hilfe eines statischen Modells wird für jeden in einer Teilperiode realisierbaren Systemzustand z.B. mit Hilfe eines Kostenkriteriums ein optimales Produktions- und Lieferprogramm ermittelt. Erst dann läßt sich der optimale Weg von Systemzustand zu Systemzustand durch den Baum unter Berücksichtigung von Systemänderungskosten mit Hilfe der dynamischen Programmierung bestimmen.[2]

2. Der Grundsatz der Systemorientierung könnte weiterhin durch die Annahme eines entscheidungsabhängigen Absatzprogrammes verletzt werden. Dies wäre immer dann der Fall, wenn der Produktionsort der Produkte die absetzbaren Mengen oder die erzielbaren Preise beeinflußt.

   Als Beispiele werden in diesem Zusammenhang oft Unternehmen genannt, die sich auf die Belieferung eines relativ kleinen Bereiches um die jeweiligen Produktionsorte beschränken.[3] Das Nachfragepoten-

---

1) Vgl. CULHANE,J.H., und andere, a.a.O., S.551 ff.

2) In der oben angegebenen Literatur sind dynamisierte Modelle auf Fälle beschränkt, bei denen sich die einzelnen Teilprobleme relativ trivial formulieren und lösen lassen. Nur dadurch kann der Lösungsaufwand auf ein vertretbares Maß reduziert werden.

3) Vgl. hierzu NIESCHLAG, DICHTL,HÖRSCHGEN, Einführung in die Lehre von der Absatzwirtschaft, Berlin, 1968, S.251 ff. Dort wird insbesondere das Problem der Datengewinnung in entsprechenden Fällen diskutiert.

tial dieses Bereiches ist dann entscheidend für die möglichen Absatzmengen. Aber auch für Unternehmen, die ein größeres Wirtschaftsgebiet beliefern, innerhalb dessen die Produktionssorte liegen, könnten Kaufpräferenzen, z.B. als Folge unterschiedlicher Lieferzeiten von den möglichen Lieferorten beeinflußt werden. In diesen Fällen sollten das Absatzprogramm und die Verteilung der Produktion auf die vorhandenen Werke simultan bestimmt werden.

Die folgenden Betrachtungen sind sämtlich statisch. Das bedeutet, daß im Rahmen eines konkreten Falles untersucht werden muß, ob eine statische Betrachtung überhaupt sinnvolle Aussagen zuläßt (vgl. Abschnitt 42).Des weiteren bedürfen die Ergebnisse einer sorgfältigen Interpretation im Hinblick auf die durch die statische Betrachtung entstehende, begrenzte Aussagefähigkeit (vgl. Abschnitt 66). Zudem beschränken sich die Überlegungen auf den Fall entscheidungsunabhängiger, d.h. von der Aufteilung der Produktion auf Werke unabhängiger Nachfragemengen.

Für dieses abgegrenzte Problem sollen im zweiten Abschnitt zunächst ohne direkten Bezug auf einen bestimmten, konkreten Fall Teilmodelle formuliert werden. Die Auswahl der Sachverhalte, die als entscheidungsabhängig gesehen werden, wird dabei aufgrund der durchgesehenen Literatur und der bei der Bearbeitung der in Abschnitt 4 beschriebenen Fallstudie gemachten Erfahrungen getroffen. Der Abschnitt zeigt im konkreten Fall mögliche Modellstrukturen. Im Zusammenhang mit Abschnitt 3, der sich insbesondere mit den Lösungsmöglichkeiten von Modellen mit entsprechender Struktur befaßt, wird deutlich, daß ein effizientes Entscheidungsmodell für den Einzelfall formuliert und gelöst werden muß. Erst aufgrund der Daten des Einzelfalls kann entschieden werden, ob und in welchem Detail entsprechende Modellteile in ein Entscheidungsmodell eingehen sollten. Dabei muß der mit der Komplexität des Modells zunehmende Aufwand bei

Datenbeschaffung und Lösung berücksichtigt werden. Entsprechend werden die Ergebnisse der Abschnitte 2 und 3 in den folgenden Abschnitten 4 bis 6 auf einen Fall angewandt, der von der Modellierung (Abschnitt 4) und Datenbeschaffung (Abschnitt 5) bis zur Modellauswertung (Abschnitt 6) durchgeführt wird.

2 DIE ERFASSUNG MÖGLICHER PROBLEMSTRUKTUREN IN EINEM ENTSCHEIDUNGSMODELL

21 Entscheidungskriterien

211 Gewinn oder Kosten als Entscheidungskriterium

Die Frage nach einer optimalen Zuordnung der Produktion zu vorhandenen Werken führt zu Überlegungen, die denen der betriebswirtschaftlichen Standortanalyse ähnlich sind. Hier wie da sind es standortbedingte Größen, die im Hinblick auf ein Entscheidungskriterium bewertet werden. Die modernere betriebswirtschaftliche Standortlehre benutzt ein Gewinnkriterium. Der Standort wird als optimal bezeichnet, an dem die Differenz zwischen standortbedingten Erträgen und standortbedingten Aufwendungen die größtmögliche ist. Dabei ist vom erwarteten Nettogewinn auszugehen, der nach Abzug der gewinnabhängigen Steuern verbleibt.[1)]

Fälle, in denen der Produktionsort die aus dem Absatz fließenden Erlöse beeinflußt, haben wir bereits im Abschnitt 1 ausgeschlossen. Für gegebene Erlöse bedeutet Gewinnmaximierung Minimierung der Aufwendungen und das bedeutet wiederum, da wir allein auf die Leistungserstellung abstellen, Minimierung der Kosten. Das gilt auch unter Einbeziehung der gewinnabhängigen Steuern. Wenn der Gewinn eine Funktion allein der Kosten ist, dann sind auch diese Steuern eine Funktion der Kosten. Ein Kostenkriterium ist somit für unsere Zwecke ausreichend.

---

1) WÖHE, G., Betriebswirtschaftliche Steuerlehre, Band II, 1. Halbband, 2. Aufl., Berlin, usw., 1965, S. 279

212 Sonstige Kriterien

Nicht alle wünschenswerten Eigenschaften einer Produktionsverteilung lassen sich mit Hilfe eines monetären Kriteriums hinreichend erfassen. Aus der Reihe denkbarer Kriterien werden lediglich zwei beschrieben, die als Kriterien bei Fallstudien mit verwandter Problemstellung Verwendung fanden.[1] Um die organisatorische Zweckmässigkeit alternativer Produktionsverteilungen zu beschreiben, wurde zum Beispiel in einer nicht veröffentlichten IBM-Studie neben einem Kostenkriterium ein Kriterium "Homogenität der Fertigung" definiert. In einer "Verträglichkeitstabelle " wurde die Verträglichkeit der Produkte im Hinblick auf Fertigung im gleichen Werk erfaßt. Eine Zellenbewertung der Tabelle gab die Verträglichkeit jeweils zweier Produkte an. Dabei bedeutet die Bewertung

2 sehr gut verträglich, wünschenswert

1 verträglich

0 unerwünscht.

Ziel war, die Produktion so auf die Werke zu verteilen, daß die Gesamtverträglichkeit groß wurde.

In den USA sind die Lieferzeiten, die sich aufgrund alternativer Produktionsverteilungen ergeben, wegen der großen Entfernungen von großer Bedeutung für die Absatzmöglichkeiten. Wenn die meisten amerikanischen Autoren trotzdem von Absatzmengen ausgehen, die sie als von den möglichen alternativen Produktionsverteilungen unabhängig behandeln, so ist das nur möglich, wenn Nebenbedingungen formuliert werden, die sich auf höchstzulässige Liefer-

---

[1] Zu dem "Zielsystem der Unternehmung", das seinerseits die Grundlage zur Definition operationaler Entscheidungskriterien bildet, vgl. BIDDLINGMAIER,J., Unternehmensziele und Unternehmensstrategien, Wiesbaden, 1964. HEINEN,E., Das Zielsystem der Unternehmung – Grundlagen betriebswirtschaftlicher Entscheidungen, Wiesbaden, 1966. NIESCHLAG u.a., a.a.O., S.149 ff.

zeiten beziehen. So wird z.B. ein Mindestprozentsatz von Kunden festgesetzt, der seine Aufträge in nicht mehr als x Tagen geliefert bekommt.[1] Auf räumlich kleineren Märkten hat dieser Gesichtspunkt jedoch geringere Bedeutung.

22 Entscheidungsabhängige Kostenarten

Die folgenden Oberlegungen beziehen sich auf ein Kostenkriterium. Ihr Ziel ist es, für die Kostenarten, die abhängig von der zu treffenden Entscheidung in unterschiedlicher Höhe anfallen, Wege aufzuzeigen, um den zwischen Kostenhöhe und einer möglichen Produktionsverteilung bestehenden, funktionalen Zusammenhang mathematisch zu formulieren.

221 Distributionskosten der Fertigprodukte

Konvention und Marktmacht sind entscheidend dafür, zu welchen Teilen Produzenten und Abnehmer die anfallenden Distributionskosten tragen. Eine häufige Regelung ist die "frei-Haus"-Lieferung ab einem bestimmten Auftragswert. Diesen Fall werden wir im folgenden unterstellen.

Den wichtigsten entscheidungsabhängigen Teil der Distributionskosten bilden die Versandkosten. Eine grobe Kostenkalkulation im Falle des Eigenversands bzw. ein Blick in die Tariftabellen für Bahn- und LKW-Versand zeigen, daß die Kosten des Versands pro Gewichtseinheit umso kleiner sind, je größer das Sendungsgewicht ist. Die Größenordnung der Abhängigkeit des Frachtpreises pro Gewichtseinheit vom Sendungsgewicht kann der folgenden, aufgrund der (inzwischen veralteten) Tarife

---

[1] vgl. KOTLER,P., Marketing Management, Englewood Cliffs, New Jersey, 1967, S.420

des "Deutschen-Eisenbahn-Güter-Tarifs" (DEGT) vom 17.3. 1966 berechneten Preistabelle entnommen werden.

Tabelle 1

Eisenbahnfrachten in DM pro 100 kg und 100 km

Entfernung in km	Sendungsgewicht in kg 200	500	1000
150	6,5	5,4	4,4
300	5,0	4,2	3,5
450	4,4	3,8	3,0
600	3,8	3,2	2,6

Selbst im Einproduktfall und unter der Annahme, daß die Verteilung der Einzelauftragsgewichte auf Gewichtsklassen jedes Absatzpunktes die gleiche ist, ist es problematisch, das herkömmliche Einprodukttransportmodell anzuwenden.[1] Die Transportkostenkeffizienten dieses herkömmlichen Modells geben die Transportkosten pro Mengeneinheit des Produktes von einem bestimmten Lieferpunkt zu einem Absatzpunkt — unabhängig vom Gewicht der einzelnen Sendung — an. Wenn unterschiedliche Sendungsgewichte und damit unterschiedliche Kosten pro transportierte Mengeneinheit auftreten, wird man die Koeffizienten als gewogenes arithmetisches Mittel der Frachtpreise der Gruppenmitten vorkommender Einzelauftragsgewichtsklassen berechnen, wobei die Gewichte

[1] Zur Beschreibung des Modells vgl. z.B. Hadley,G., Linear Programming, Reading,Mass., Addison-Wesley 1962, S.273 ff. Eine ausführliche Literaturzusammenstellung insbesondere zu Anwendungen des Modells im Produktionsbereich gibt: Hammann,P., Einige Obertragungen des Transportmodelltyps auf Produktionssektormodelle, Diss., München, 1965.

die Besetzungen der Auftragsgewichtsklassen sind. Wenn man stattdessen Auftragsgewichtsklassen als fiktive Produkte behandelt, erhält man – vorausgesetzt, daß die Werkskapazitäten echte Restriktionen sind – eine vom ersten Fall verschiedene, genauere Lösung. Für den teureren Transport kleiner Auftragsgewichte wird der tendenziell günstigere Lieferort ausgesucht. (Dies ist besonders einsichtig, wenn man sich den Grenzfall überlegt, bei dem die Transportkostenkoeffizienten einer Auftragsgewichtsklasse gegen Null gehen.) Das gröbere Modell kann nicht einmal mit dem Hinweis auf kleineren Lösungsaufwand gerechtfertigt werden. Dem kleineren Aufwand bei der Optimierung steht ein größerer Aufwand bei der Vorbereitung der Daten gegenüber.

Im Mehrproduktfall tritt als weiterer Gesichtspunkt hinzu, daß, wenn Kunden mehrere Produkte in einer Bestellung zusammenfassen, die gewählte Produktionsverteilung die Transportkosten pro Gewichtseinheit beeinflußt. Es sind drei Fälle möglich:

1. Alle bestellten Produktarten werden im liefernden Werk gefertigt. In diesem Fall können die minimalen Transportkosten pro Gewichtseinheit realisiert werden, da der gesamte Auftrag in einer Sendung transportiert werden kann.

2. Die bestellten Produktarten werden nicht alle im liefernden Werk gefertigt, nicht in diesem Werk gefertigte Produkte werden aber auf Lager gehalten. Zwar kann hier das maximale Sendungsgewicht realisiert werden, es fallen aber zusätzliche Kosten für den Werk-zu-Werk-Transport und möglicherweise erhöhte Lagerkosten an.

3. Die bestellten Produktarten werden nicht im liefernden Werk gefertigt. Die Bestellung wird von mehreren Werken getrennt ausgeliefert. Die minimalen Transportkosten pro Gewichtseinheit können nicht realisiert werden.

Daraus folgt, daß das Konzept konstanter Transportkostenkoeffizienten des herkömmlichen Einprodukttransportmodells auf einen solchen Mehrproduktfall nicht angewendet werden kann.

MAGEE[1] und SHYCON, MAFFEI[2] beschreiben den Sachverhalt des zweiten Gesichtspunkts ohne eine mathematische Formulierung zu versuchen, die die Bestimmung einer optimalen Kombination der oben beschriebenen Liefermöglichkeiten für das Gesamtsystem mit analytischen Methoden zuließe. SHYCON und MAFFEI schlagen eine Simulation, MAGEE einen groben Kostenvergleich vor. Im folgenden versuchen wir ein lineares Modell zu entwickeln, das die geschilderten Zusammenhänge erfaßt.

Wir gehen aus von der Kennzeichnung der Nachfrage. Den Kunden interessiert, daß er in dem im Modell betrachteten Planungszeitraum die vom Markt her definierten Absatzprodukte in den gewünschten Gesamtmengen (je Planungsperiode) und entsprechend den in den Einzelaufträgen angegebenen Bestellmengen erhält. Die Erfassung der Bestellgewichte ist dabei — wie bereits oben dargelegt — wichtig, weil von ihnen der Frachtpreis pro transportierter Gewichtseinheit mit abhängt. Weiterhin kann man annehmen, daß es dem Kunden gleichgültig ist, ob er einen Auftrag über mehrere Absatzprodukte in mehreren Teillieferungen oder in einer Gesamtlieferung bekommt. Deshalb werden Nachfragekategorien zunächst einmal unterschieden nach

- vom Markt her definierten Absatzprodukten und
- Bestellgewichten, in denen diese Absatzprodukte nachgefragt werden.

---

[1] MAGEE, J.F., a.a.O., S.242 f.

[2] SHYCON, H.N., MAFFEI, R.B., Simulation-Tool for better Distribution, in: Harvard Business Review, Vol.38, No.6, 1960, S.65 ff.

Es ist natürlich notwendig, für jedes Absatzprodukt eine relativ zu der Zahl der tatsächlich realisierten Bestellgewichte sehr kleine Anzahl von Bestellgewichten zu berücksichtigen. Hierzu wird man für jedes Absatzprodukt die Bestellgewichtsstruktur in wenigen Bestellgewichtsklassen zusammenfassen und im weiteren mit dem Bestellgewicht der Gruppenmitte arbeiten. Eine in dieser Weise sinnvoll vereinfachte Absatzstruktur kann nur auf der Grundlage von Daten entwickelt werden (vgl. Abschnitt 51). Die entstehenden Absatzkategorien werden mit dem Index m durchnummeriert.[1]

A^1_{mk} sei die Nachfrage (in Mengeneinheiten/Planungsperiode) des Absatzpunktes k und der Absatzkategorie m, wobei $m = 1,\ldots,m^*$, $k = 1,\ldots,k^*$.

Die in einer Planungsperiode von einem Werk j zu einem Absatzpunkt k versandten Mengen werden mit Y^1_{ljk} (in Mengeneinheiten/Planungsperiode) gekennzeichnet. Diese Mengen sind eine erste Klasse von Entscheidungsvariablen. Der Index l bezeichnet Lieferkategorien. Zunächst ist es möglich, jedes vom Markt her definierte Absatzprodukt entsprechend den in den Einzelaufträgen angegebenen Be-

---

[1] Indizes werden im folgenden grundsätzlich mit kleinen Buchstaben bezeichnet. Der höchste Wert, den ein Index annehmen kann, wird mit dem Buchstaben des Laufindex und einem Stern bezeichnet. ($i = 1,\ldots,i^*$). Hochgestellte Ziffern werden benutzt, um Koeffizienten oder Variable, die zu einer Gruppe gehören, die ihrerseits durch einen bestimmten Großbuchstaben gekennzeichnet wird, einzeln zu spezifizieren. Z.B. werden Kostenkoeffizienten grundsätzlich mit "C" gekennzeichnet. Transportkostenkoeffizienten des Werk zu Kundentransports mit C^1 , Transportkostenkoeffizienten des Werk-zu-Werk-Transports mit C^2 . Entsprechend bezeichnet Y transportierte Mengen, wobei Y^1 den Werk zu Kundentransport, Y^2 den Werk zu Werktransport kennzeichnet. Wird statt eines Index ein Punkt gesetzt, z.B. $A^1_{n,}$, so soll das andeuten, daß die Aussage für einen beliebigen 2. Index gilt.

stellmengen in einer Einzelsendung anzuliefern. Das heißt, werden z.B. zwei Absatzprodukte in einem Auftrag nachgefragt, so kann jedes Absatzprodukt für sich entsprechend der im Auftrag angegebenen Bestellmenge geliefert werden. Wir erhalten Lieferkategorien l, die genau den oben definierten Absatzkategorien m entsprechen, die also aufgrund von Bestellgewichten für einzelne Absatzprodukte und Absatzprodukte unterschieden werden.

Wir wissen aber, daß immer dann, wenn mehrere Absatzprodukte zusammen bestellt werden, der Frachtpreis (in Geldeinheiten/Mengeneinheit) besonders klein ist, wenn der Auftrag in einer Sendung verschickt werden kann. Das bedeutet, daß zusätzliche Lieferkategorien definiert werden müssen, die Lieferungen von mehreren Produkten in einer Sendung kennzeichnen. Diese zusätzlichen Lieferkategorien $l = m^* + 1,\ldots,l^*$ werden definiert

- aufgrund des Gesamtsendungsgewichts,
- der in der Sendung enthaltenen Absatzprodukte und
- hinsichtlich des Gewichtsanteils, den verschiedene Absatzprodukte an der Gesamtsendung ausmachen.

Auch hier ist es notwendig, die vorkommenden Einzelaufträge vereinfacht in einer relativ zur tatsächlichen Vielfalt vorkommender Auftragszusammensetzungen kleinen Anzahl von Auftragstypen zusammenzufassen. (Im Abschnitt 51 wird beschrieben, wie durch Auswertung von Daten eine entsprechend vereinfachte Lieferstruktur gewonnen werden könnte.)

Die Gewichtsanteile der verschiedenen Absatzprodukte an der Gesamtsendung, die aufgrund der getroffenen Einteilung der Lieferkategorien festgelegt sind, sind identisch mit dimensionslosen Koeffizienten D^1_{lm}, die angeben, welchen Beitrag eine Mengeneinheit der Liefervariablen $Y^1_{l..}$ zur Befriedigung der Nachfragemenge A^1_m. leistet. Für diese Koeffizienten gilt:

$$D^1_{lm} = \begin{cases} 1 & \text{wenn sich Lieferkategorie und Absatzkategorie bei Lieferung von nur einer Absatzproduktart in einer Sendung entsprechen} \\ 0 < D_{lm} < 1 & \text{wenn die Lieferung über mehrere Produkte geht und die der Kategorie m entsprechende Produktart in der Liefermenge l enthalten ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

wobei $l = 1,\ldots,l^*, m = 1,\ldots,m^*$

Damit lassen sich Bedarfsrestriktionen wie folgt formulieren:

$$\sum_{jl} D^1_{lm} \, Y^1_{ijk} \geq A^1_{mk} \qquad (2.1)$$

für $m=1,\ldots m^*$, $k=1,\ldots,k^*$

Die Restriktionen (2.1) lassen es zu, daß alle Nachfragemengen kostengünstig (wegen des dann höheren Sendungsgewichts) in Lieferkategorien, die mehrere Absatzprodukte umfassen, geliefert werden. Da aber ein Teil der Aufträge nur über ein Absatzprodukt lautet, muß sichergestellt werden, daß die billigeren Lieferungen mehrerer Absatzprodukte in einer Sendung höchstens im Rahmen der Aufträge, die tatsächlich über mehrere Absatzprodukte lauten, erfolgen. Daraus ergibt sich, daß die Nachfrage zusätzlich im Hinblick auf die Auftragszusammensetzungen und die sich daraus möglicherweise ergebenden Sendungszusammensetzungen gekennzeichnet werden muß.

A^2_{nk} bezeichne Mengen (in Mengeneinheiten/Planungsperiode), die im Rahmen von Aufträgen über mehrere Absatz-

produkte "maximal" in einer Sendung, die mindestens zwei Absatzprodukte umfaßt, geliefert werden können. Die Kategorien n entsprechen dabei in der Zusammensetzung den bereits oben definierten Lieferkategorien l, soweit diese Sendungen mit mindestens zwei Absatzprodukten kennzeichnen. k bezeichnet wiederum den Absatzpunkt.

Der Begriff "maximal" in der obigen Definition bedarf besonderer Erläuterung. Eine bestimmte Lieferkategorie $\bar{n}$ ist gekennzeichnet durch ein Gesamtsendungsgewicht und das Gewichtsverhältnis, in dem mindestens zwei Absatzprodukte in der Sendung enthalten sind. Wenn die Lieferkategorie $\bar{n}$ z.B. zwei Absatzprodukte beinhaltet, dann können maximal in dieser Kategorie versandt werden

- alle Aufträge, deren Zusammensetzung und Gewicht der Lieferkategorie $\bar{n}$ entsprechen und
- alle Teilaufträge, deren Zusammensetzung und Gewicht der Kategorie entsprechen, vorausgesetzt sie werden nicht im Rahmen einer Lieferkategorie, die den Gesamtauftrag bzw. einen umfassenderen Teilauftrag beinhaltet, geliefert. Wird eine solche umfassendere Kategorie realisiert, dann müssen die entsprechenden Liefermengen von der Menge $A^2_{\bar{n}.}$ abgezogen werden. (In den Ungleichungen (2.2) sind diese Liefermengen auf die linke Seite gezogen.)

Zusätzliche, dimensionslose Koeffizienten D^2_{ln}, deren Werte sich wiederum unmittelbar aufgrund der aus der Datenanalyse gewonnenen, vereinfachten Absatzstruktur ergeben, geben dabei den Teil einer Mengeneinheit an, den eine Mengeneinheit der Liefervariablen $Y^1_{l..}$ von den Mengen $A^2_{n.}$ in Anspruch nimmt.

$$\sum_{jl} D^2_{ln} \, Y^1_{ljk} \leq A^2_{nk} \qquad (2.2)$$

für $n=1,\ldots,n^*$, $k=1,\ldots,k^*$

Entscheidend ist, daß für die Liefervariablen Y^1_{ljk} jetzt konstante Transportkostenkoeffizienten C^1_{ljk} (in Geldeinheiten/ Mengeneinheit) definiert werden können, die die Kosten des Transports einer Mengeneinheit der Lieferkategorie l von Werk j zum Absatzpunkt k angeben.

Von einem bestimmten Werk kann nur geliefert werden, wenn die entsprechenden Mengen

a. im Werk gefertigt werden und nicht in ein anderes Werk zur Vervollständigung dessen Liefersortiments transportiert werden oder wenn sie

b. zuvor von einem anderen Werk zum liefernden Werk transportiert wurden.

Entsprechend definieren wir

X_{ij} Menge (in Mengeneinheiten/Planungsperiode) des Fertigungsproduktes i, die im Werk j produziert wird.
Diese Mengen bilden die zweite Gruppe von Entscheidungsvariablen. Fertigungsprodukte sind insbesondere dann von Absatzprodukten zu unterscheiden, wenn ein Absatzprodukt mit verschiedenen Verfahren hergestellt werden kann. Ist z.B. ein Verfahren arbeitsintensiver als ein anderes und bestehen Lohnkostenunterschiede zwischen Werksstandorten, so ist die Berücksichtigung verschiedener Verfahren entscheidungsrelevant.

Y^2_{rst} Menge (in Mengeneinheiten/Planungsperiode), die von einem Absatzprodukt r im Rahmen des Werk-zu-Werk-Transports vom Werk s zum Werk t transportiert wird.
Im Werk-zu-Werk-Transport sind weder Bestellgewichte noch Fertigungsgesichtspunkte zu beachten. Vielmehr werden die einzelnen Absatzprodukte r in großen, den günstigsten Frachtpreis realisierenden Mengen von Werk zu Werk transportiert.

D^3_{li} dimensionslose Koeffizienten, die den Teil einer Mengeneinheit angeben, den eine Mengeneinheit der Liefervariablen $Y^1_{l..}$ von der Produktionsmenge $X_{i.}$ verbraucht.

D^4_{ri} dimensionslose Koeffizienten, die den Teil einer Mengeneinheit angeben, den die Liefervariable $Y^2_{r..}$ von der Produktionsmenge $X_{i.}$ verbraucht bzw. zu ihr beiträgt.

Die Restriktionen lassen sich damit schreiben:

$$\sum_{kl} D^3_{li}\, Y^1_{ljk} \leq X_{ij} \qquad (2.3)$$

$$+ \sum_{r} D^4_{ri} \left(\sum_{s \neq j} Y^2_{rsj} - \sum_{s \neq j} Y^2_{rjs} \right)$$

$$\text{für } i=1,\ldots i^*,\ j=1,\ldots,j^*$$

Eine weitere Klasse von Restriktionen bezieht sich auf die im betrachteten Zeitraum nicht zu verändernden Werkkapazitäten. Soweit sich diese Restriktionen auf den Absatz beziehen, kann es zweckmäßig sein, die Variablen Y^1_{ljk} zu verwenden. Zum Beispiel könnte eine die vorhandene Lagerfläche eines Werkes j betreffende Restriktion lauten

$$\sum_{l,k} Y^1_{ljk} \cdot E^1_l \leq B^1_j \qquad \text{für } j=1,\ldots,j^* \qquad (2.4)$$

wobei E^1_l den Lagerflächenbedarf der Variablen $Y^1_{l..}$ (in Flächeneinheiten/Mengeneinheit), und B^1_j die Lagerfläche des Werkes j (in Flächeneinheiten) bezeichnet.

Soweit die Restriktionen sich auf die Produktions-Kapazität beziehen, wird man die Variablen X_{ij} benutzen und Restriktionen in der Form

$$\sum_{i} X_{ij}\, E^2_i \leq B^2_j \qquad \text{für } j=1,\ldots,j^* \qquad (2.4a)$$

definieren, wobei E^2_i Produktionskoeffizienten (in Kapazitätseinheiten der Engpaß Kapazität/Produktmengeneinheit) und B^2_j die Kapazität eines möglichen Produktionsengpasses (in Kapazitätseinheiten/Planungsperiode) bezeichnen können.

Für die definierten Variablen verlangen wir Nichtnegativität

$$X_{ij} \geq 0 \quad Y^1_{ijk} \geq 0 \quad Y^2_{rst} \geq 0 \qquad (2.5)$$

für $i=1,\ldots,i^*$, $j=1,\ldots,j^*$, $k=1,\ldots,k^*$,
$r=1,\ldots,r^*$, $s=1,\ldots,s^*$, $t=t,\ldots,t^*$

Die insgesamt anfallenden Transportkosten TK (in Geldeinheiten/Planungsperiode) sind

$$TK = \sum_{ijk} C^1_{ijk}\, Y^1_{ijk} + \sum_{rst} C^2_{rst} \quad Y^2_{rst} \qquad (2.6)$$

wobei die Koeffizienten C^2_{rst} die Kosten des Transports einer Mengeneinheit eines im Hinblick auf den Werk-zu-Werk Transport sinnvoll definierten Produktes r von Werk s nach Werk t (in Geldeinheiten/Mengeneinheit) angeben.

Damit ist die grundsätzliche Struktur des vorgeschlagenen Ansatzes beschrieben. Wir erhalten ein lineares Modell. Die Genauigkeit des Modells hängt davon ab, wieviele nach Arten und Mengen verschiedene Auftragszusammensetzungen berücksichtigt werden. Wenn sich keine typischen Auftragszusammensetzungen feststellen lassen, mehr noch aber, wenn die Zahl der Werke groß ist und damit ein Auftrag über mehrere Produktarten in eine Vielzahl möglicher Teilsendungen von verschiedenen Werken aufgespalten werden kann, ist eine vertretbare Modellgröße schnell überschritten.

In der in den Abschnitten 4-6 beschriebenen Fallstudie werden unterschieden: 2 Werke, 9 Absatzpunkte, 8 Absatzprodukte, 47 Lieferprodukte (l=1,...,47) und 15 von der

Produktion her zu unterscheidende Produkte (i=1,...,15). Ohne Slack-Variable erhalten wir eine Matrix mit 452 Zeilen, 892 Spalten und rund 4 000 von Null verschiedenen Matrixelementen.

Wir schließen diesen Abschnitt mit dem Hinweis auf einige Sachverhalte ab, die sich zusätzlich einfach im Modell berücksichtigen lassen.

1. Es ist häufig, daß die Lieferkosten der Bestellungen mit geringem Auftragswert von den Kunden zu tragen sind. Dieser Sachverhalt läßt sich mit einer Klasse von Restriktionen, die entsprechend den Restriktionen des Typs (2.2) gebaut sind, erfassen. Die den Y^1_{ljk} zugehörigen Transportkostenkoeffizienten sind in diesem Falle $C^1_{ljk} = 0$.
2. Im Falle mehrstufiger Fertigung kann der Werk zu Werk -Transport von Halbfabrikaten mit Hilfe einer zusätzlichen Klasse von "Y"-Variablen erfaßt werden, die von den einzelnen Werken nach Maßgabe der dort gefertigten Endproduktmengen nachgefragt werden.
3. Ganz entsprechend könnten die Kosten des Rohmaterialtransports, soweit er vom Unternehmen zu tragen ist, berücksichtigt werden.
4. Handelswaren, die zur Abrundung des Sortiments geführt werden, könnte man als fiktive Produktionsmengen erfassen, für die weder Produktionskosten anfallen noch Produktionskapazität verbraucht wird.

222 Abbaufähige Kapazitätskosten

Der in der Betriebswirtschaftslehre eingebürgerte Begriff der "Leerkapazität" eignet sich, um den im folgenden behandelten Sachverhalt zu verdeutlichen.

Unter Leerkapazität versteht man die Kapazität von Produktionsfaktoren, die zwar vorhanden sind, zur Produktion aber nicht oder nur teilweise eingesetzt werden. Für den einzelnen Produktionsfaktor ist das Auftreten

einer Leerkapazität dann unvermeidbar, wenn seine Kapazität nur ganzzahlig variiert werden kann, und die im betreffenden Werk produzierten Produktmengen nicht gerade ein Vielfaches der Kapazität einer Faktoreinheit beanspruchen. Solche Produktionsfaktoren sind der Mensch und die Maschine. Im einzelnen Werk kann die nicht abbaufähige Leerkapazität nur kleiner als die Kapazität einer Faktoreinheit sein. Die Summe der Leerkapazitäten eines einzelnen Faktortyps kann bei mehreren Werken jedoch größer als die Kapazität der Faktoreinheit sein. In diesem Fall kann es möglich sein durch Produktionsumverteilung Faktoreinheiten einzusparen. Inwieweit entsprechende Alternativen durchführbar sind, hängt davon ab, ob die im Betrachtungszeitraum nicht veränderbaren Werkskapazitäten eine entsprechende Umverteilung der Produktion zulassen. Wenn z.B. die vorhandenen Werkskapazitäten die Auflösung eines der Werke ausschließen, können Werksleitungen, Produktionsplanung und Kontrolle, notwendige Hilfsbetriebe etc. selbst dann nicht eingespart werden, wenn deren Kapazität auch nur zu einem kleinen Teil genutzt wird.

Um den Sachverhalt in einem Modell zu erfassen, müssen wir ganzzahlige Variabel Z^1_{jp} definieren, die die Zahl der im Werk j benötigten Faktoren vom Typ p (in diskreten Mengeneinheiten) angeben. Weiter bezeichnen wir mit

C^3_{jp} die Kosten einer Einheit des Faktors m (in Geldeinheiten/Faktoreinheit und Planungszeitraum), möglicherweise in Abhängigkeit vom Werksstandort j

F_p Kapazität eines Faktors vom Typ p (in Kapazitätseinheiten/Faktoreinheit und Planungsperiode)

G^1_{ip} Produktionskoeffizienten, die angeben, wieviele Kapazitätseinheiten des Faktors p durch die Produktion einer Mengeneinheit des Produktes i verbraucht werden (in Kapazitätseinheiten/Produktmengeneinheit)

Die Zahl der im Werk j benötigten Faktoren vom Typ p ist:

$$\sum_i G^1_{ip} \cdot X_{ij} \leq F_p \cdot Z^1_{jp} \qquad (2.7)$$

für $j=1,\ldots,j^*$, $p=1,\ldots,p^*$

Wir verlangen

$$Z^1_{jp} \geq 0 \text{ und ganzzahlig} \qquad (2.8)$$

für $j=1,\ldots,j^*$, $p=1,\ldots,p^*$

und erhalten die Kosten LK (in Geldeinheiten/Planungsperiode) der insgesamt benötigten Kapazität solcher Faktoren, bei denen Leerkapazitäten auftreten.

$$LK = \sum_{jp} Z^1_{jp} \cdot C^3_{jp} \qquad (2.9)$$

Die Produktionsfaktoren (p), die in diesem Zusammenhang definiert werden, werden (insbesondere bei maschinenintensiver Produktion) unter Umständen nicht Einzelaggregate sein, sondern Kombinationen von Menschen und Maschinen, die zusammen eine für ganz bestimmte Fertigungen geeignete Einheit bilden, deren Kapazität durch die Arbeitsgeschwindigkeit einer Maschine bestimmt wird. Dieser Formulierung liegt die Annahme zugrunde, daß die Kosten vorhandener Faktoren, die nicht eingesetzt zu werden brauchen, vollständig abgebaut werden können. Diese Annahme ist nur dann nicht problematisch, wenn der Fall, daß einsatzfähige Produktionsfaktoren nicht benötigt werden, nicht eintritt, weil das Unternehmen wächst oder zumindest durch das Unterlassen von Reinvestitionen das Freisetzen vorhandener Kapazitäten verhindert werden kann. Werden dagegen Kapazitäten frei gesetzt, so ist es fraglich, ob die durch sie verursachten Kosten abgebaut werden können. So kann es Firmenpolitik sein, freigesetzte Arbeitskräfte nicht zu entlassen, sondern notfalls unproduktiv zu beschäftigen. Desgleichen sind Spezialmaschinen möglicherweise nur mit Verlust zu verkaufen.

223 Sortenwechselkosten

Die Schwierigkeit, Sortenwechselkosten in Abhängigkeit von der zu treffenden Entscheidung zu erfassen, steht in keinem Verhältnis zu ihrer meist geringen Bedeutung. Kostenstudien zeigen, daß die einem Sortenwechsel zurechenbaren Kosten in aller Regel überschätzt werden.[1] Das verbreitete Vollkostendenken verführt dazu, einem Sortenwechsel Kosten zuzurechnen, die bei Wegfall des Sortenwechsels nicht abgebaut werden können bzw. bei einem zusätzlichen Sortenwechsel nicht zusätzlich anfallen. Wir betrachten zunächst die bei e i n e m Sortenwechsel anfallenden Kosten.

Die bisher entwickelten Modellteile beinhalten die Voraussetzung, daß die im Betrachtungszeitraum nicht veränderbaren Werkskapazitäten ausreichen, um die erwarteten Absatzmengen zu produzieren, bzw. daß die veränderbaren Werkskapazitäten entsprechend erhöht werden. Damit beeinflußt ein zusätzlicher Sortenwechsel nicht die Erlöse, sondern nur die Kosten der Kapazität, die als Folge des Sortenwechsels verbraucht wird.

In welchem Umfang ein Sortenwechsel zusätzliche Kosten verursacht, hängt wiederum von der Teilbarkeit der Kapazität der Produktionsfaktoren ab. Gut teilbar ist z.B. der Faktor Werkstoffe. Entsteht bei einem Sortenwechsel Schrott (z.B. beim Anlaufen der Produktion nach dem Sortenwechsel), dann können die Kosten des unbrauchbar gewordenen Materials dem Sortenwechsel direkt zugerechnet werden. Schlecht teilbar sind die Faktoren Betriebsmittel und Arbeit. Abschreibungen und Zinsen für eine zusätzliche Maschine fallen nur dann als Folge einer Erhöhung der Zahl der Sortenwechsel bei einem bestimmten

---

[1] Gutenberg, E., Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, 1.Band: Die Produktion, 14.Aufl, Berlin usw., 1968, S.167 ff.

Maschinentyp an, wenn die für diese Sortenwechsel zusätzlich verbrauchte Kapazität größer als die in einem Werk vorhandene Leerkapazität ist. Es wäre falsch, die Abschreibungs- und Zinskosten anteilig auf die beim Sortenwechsel verbrauchte Zeit umzulegen.

Zur Bestimmung der Zahl der Sortenwechsel als Funktion der Produktionsverteilungsalternativen ist es notwendig eine im übrigen gegebene Produktions- und Lagerpolitik zu unterstellen. Das hier auftretende Problem der simultanen Bestimmung optimaler Losgrößen und Reihenfolgen für mehrere Produkte, die auf den gleichen Aggregaten nacheinander produziert werden müssen, ist bisher nicht exakt lösbar. Besonders komplex ist das Problem dann, wenn die Sortenwechselzeiten von der Reihenfolge abhängen, in der die Produkte zur Fertigung eingeplant werden.[1)]

Häufig arbeiten Betriebe mit Faustregeln, die sich auf ungefähre Losgrößen und das Einhalten von Mindestlagermengen beziehen. Wann und mit welcher genauen Menge ein Produkt zur Produktion eingeplant wird, ergibt sich dann aus den zufälligen Absatzschwankungen im Zeitablauf.

Eine annähernd genaue Erfassung dieser Sachverhalte ist in unserem Modellansatz unmöglich. Mit Hilfe alternativer, vereinfachender Annahmen über die Abhängigkeit der Zahl der Sortenwechsel in einem Werk j von der produzierten Menge X_{ij} eines Produktes i, erhalten wir zwei Formulierungsmöglichkeiten:

[1)] Vgl. Gutenberg, a.a.O., S.211 ff. und Strobel,W., Simultane Losgrößenbestimmung bei stationären Modellen, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 1964, S.267., sowie Adam,D., Simultane Ablauf- und Programmplanung bei Sortenfertigung mit ganzzahliger linearer Programmierung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 1963, S.233-245

1. Angenommen man wolle – unabhängig davon, in wieviel Werken ein bestimmtes Produkt gefertigt werden soll – eine für das Produkt festgelegte, ungefähre Losgröße einhalten. In diesem Fall ist die Zahl der Sortenwechsel weitgehend unabhängig davon, in wieviel Werken das Produkt gefertigt wird. In je mehr Werken das Produkt gefertigt wird, umso kleiner sind die auf das einzelne Werk entfallenden Nachfragemengen, um so seltener muß das Produkt zur Produktion eingeplant werden; aber, um so größer sind die durchschnittlichen Lagerbestände des Gesamtunternehmens für dieses Produkt. Unterstellt man den einfachsten Fall des klassischen Losgrößenmodells (kontinuierliche Nachfrage mit konstanter Nachfragerate), so ist der durchschnittliche Lagerbestand des Werkes gleich der halben Losgröße. Wenn Sicherheitslagerbestände nicht für das Unternehmen als ganzes sondern für einzelne Werke, in denen ein bestimmtes Produkt gefertigt wird, gehalten werden, ist der durchschnittliche Lagerbestand eines Werkes um diesen Sicherheitsbestand zu erhöhen. Die entscheidungsabhängigen Lagerhaltungskosten können dann grob wie folgt erfaßt werden:

   Wir definieren dimensionslose 0 - 1 Variable Z^3_{ij} für die gilt

$$Z^2_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls Produkt } i \text{ in Werk } j \text{ gefertigt wird} \\ 0 & \text{wenn nicht} \end{cases}$$

   und Kostenkoeffizienten C^4_i, die die Lagerhaltungskosten (in Geldeinheiten/Planungsperiode) angeben, die entstehen, wenn das Fertigungsprodukt i in einem Werk gefertigt wird.

Die folgenden Nebenbedingungen stellen sicher, daß Z^2_{ij} die gewünschten Werte annimmt.

$$0 \leq Z^2_{ij} \leq 1 \text{ und ganzzahlig} \qquad (2.10)$$

für $i=1,\ldots,i^*$, $j=1,\ldots,j^*$

$$X_{ij} \leq U \cdot Z^2_{ij} \qquad (2.11)$$

für $i=1,\ldots,i^*$, $j=1,\ldots,j^*$

wobei U eine beliebige Konstante mit der Dimension (Mengeneinheiten/Planungsperiode) ist, die so groß sein muß, daß die Nebenbedingungen, in der sie verwendet wird, den Lösungsbereich anderer Nebenbedingungen nicht verkleinern.

Die anfallenden Kosten MK (in Geldeinheiten/Planungsperiode) sind

$$MK = \sum_{i,j} C^4_i \cdot Z^2_{ij} \qquad (2.12)$$

2. Angenommen man wolle — unabhängig davon, in wieviel Werken ein bestimmtes Produkt gefertigt werden soll — eine bestimmte durchschnittliche Gesamtlagermenge für das Unternehmen als Ganzes realisieren. In diesem Fall müssen die Losgrößen kleiner gewählt werden, wenn ein Produkt statt in einem, in mehreren Werken gefertigt werden soll. Die einfachste Annahme ist, eine fixe Zahl von Sortenwechseln[1] für jedes Werk zu unterstellen in dem ein bestimmtes Produkt gefertigt wird. Ganz entsprechend zum obigen Fall 1 definieren wir dimensionslose 0 - 1 Variable Z^3_{ij}, für die gilt

$$Z^3_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls Produkt } i \text{ in Werk } j \text{ gefertigt wird} \\ 0 & \text{wenn nicht} \end{cases}$$

[1] in der Planungsperiode

Zusätzlich bezeichnen wir mit:

G^a_{iq} Produktionskoeffizienten, die angeben, wieviel Kapazität des Faktors q durch Sortenwechsel verbraucht wird, wenn das Produkt i im betreffenden Werk gefertigt wird (in Kapazitätseinheiten/Planungsperiode)

F_q Kapazität eines Faktors vom Typ q (in Kapazitätseinheiten/Faktoreinheit und Planungsperiode)

Die im Abschnitt 23 formulierte Klasse von Nebenbedingungen (7) ändert sich wie folgt:

$$\sum_i (G^i_{iq} X_{ij} + G^a_{iq} Z_{ij}) \leq F_q \cdot Z^1_{jq} \qquad (2.7a)$$

für $j=1,\ldots,j^*$, $q=1,\ldots,q^*$

Ganz entsprechend zu den Nebenbedingungen (10) und (11) des ersten Falles erhalten wir die Nebenbedingungen

$$0 \leq Z^a_{ij} \leq 1 \text{ und ganzzahlig} \qquad (2.10a)$$

für $i=1,\ldots,i^*$, $j=1,\ldots,j^*$

$$X_{ij} \leq U \cdot Z^a_{ij} \qquad (2.11a)$$

für $i=1,\ldots,i^*$, $j=1,\ldots,j^*$

Die den Sortenwechseln des Produktes i in einem Werk direkt zurechenbaren Kosten seien C^a_i (in Geldeinheiten/Planungsperiode).

Die anzusetzenden Faktorkosten sind:

$$MK' = \sum_{i,j} C^a_i \cdot Z^a_{ij} \qquad (2.12a)$$

224 Steuern

Das Streben des Gesetzgebers nach einer möglichst lückenlosen Steuererfassung hat zu einem an sehr vielen betrieblichen Tatbeständen anknüpfenden Steuersystem geführt. Eine knappe Formulierung der möglichen Steuerbelastungsunterschiede wird dadurch sehr erschwert. Die folgenden Überlegungen beschränken sich auf die in unserem Zusammenhang wichtigste Steuerart: die Gewerbesteuern.

Unterschiedliche Aufteilungen der Produktion auf die vorhandenen Werke eines Unternehmens können die Gewerbesteuerbelastung selbst dann beeinflussen, wenn die Lohnsumme, der Gewerbeertrag und das Gewerbekapital des Unternehmens als Ganzes von der Produktionsverteilung unabhängig sind. Den Gemeinden ist es gestattet, innerhalb bestimmter Grenzen die Hebesätze der Gewerbesteuern nach §§16 und 25 GewStG selbst zu bestimmen. Sind mehrere Betriebsstätten (Werke) vorhanden, so wird bei Gewerbekapital- und -ertragssteuer ein einheitlicher Steuermeßbetrag für den Gewerbebetrieb (das Unternehmen) auf die Gemeinden, in denen die Werke liegen, aufgeteilt.

Für Fertigungsbetriebe gilt nach §29 GewStG als Aufteilungsverhältnis

"das Verhältnis, in dem die Summe der Arbeitslöhne, die an die bei allen Betriebsstätten beschäftigten Arbeitnehmer gezahlt worden sind, zu den Arbeitslöhnen steht, die an die bei den Betriebsstätten der einzelnen Gemeinden beschäftigten Arbeitnehmer gezahlt worden sind."

Der auf die berechtigten Gemeinden entfallene Steuerbetrag ergibt sich durch Multiplikation des auf die Gemeinde entfallenden Teils des Steuermeßbetrags mit dem von der Gemeinde selbst festgesetzten Hebesatz.

Zur Bestimmung der Lohnsummensteuer werden die Bruttolöhne jeder Betriebsstätte (jedes Werkes) aufsummiert. Durch Multiplikation mit einer Steuermeßzahl erhält man

den Steuermeßbetrag, auf den der Hebesatz der Gemeinde angewendet wird.

Bei den Gewerbesteuern ergeben sich daher Steuerunterschiede, wenn

1. die Hebesätze der berechtigten Gemeinden unterschiedlich hoch sind und
2. sich durch die Produktionsumverteilung das Lohnsummenverhältnis zwischen den Werken ändert.

Zunächst läßt sich unter der vereinfachten Annahme konstanten Gewerbeertrags (in Geldeinheiten/Planungsperiode) und -kapitals (in Geldeinheiten) der Einfluß unterschiedlicher Hebesätze der Gemeinden strukturieren.

Wir benutzen die folgenden Bezeichnungen:

H_j^1 Hebesatz der Gewerbekapital und -ertragssteuer der Gemeinde in der Werk j liegt (dimensionslos)

H_j^2 entsprechender Hebesatz der Lohnsummensteuer (dimensionslos)

M als konstant angenommener geschätzter Steuermeßbetrag für die Gewerbekapital- und -ertragssteuer(in Geldeinheiten/Planungsperiode)

N Steuermeßzahl zur Lohnsummensteuer (dimensionslos)

P_j^1 im Rahmen der zu treffenden Entscheidung fixe Lohn- und Gehaltssumme des Werkes j (in Geldeinheiten/Planungsperiode)

P_j^2 von der gewählten Produktionsverteilung abhängige Lohn- und Gehaltssumme des Werkes j (in Geldeinheiten/Planungsperiode)

Die Unterscheidung von fixen und variablen Lohn- und Gehaltsteilen ist notwendig, da man, solange ein Werk nicht aufgelöst wird, wohl in jedem Fall ein bestimmtes Führungs- und Verwaltungspersonal benötigt, dessen Größe von den im Werk produzierten Mengen unabhängig ist. Die variable Lohnsumme eines Werkes hängt von der Art und Menge der im Planungszeitraum produzierten Ferti-

gungsprodukte ab. Obwohl sich diese Lohnsumme mit der Zahl der beschäftigten Arbeitskräfte in diskreten Schritten ändert, werden die variablen Lohnkosten im folgenden als stetige und zudem lineare Funktionen der produzierten Mengen angenommen. Dabei seien

L_{ij} die variablen Lohnkosten je Produkteinheit des Produktes i, das im Werk j gefertigt wird (in Geldeinheiten/Produktmengeneinheit).

Die variable Lohnsumme im Werk j ist

$$P_j^2 = \sum_i L_{ij} X_{ij} \qquad (2.13)$$

$$\text{für } j=1,\ldots,j^*$$

Der anfallende Gewerbesteuerbetrag (Gewerbekapital-, -ertrag- und Lohnsummensteuer) SK (in Geldeinheiten/Planungsperiode) kann nun als Funktion der in den einzelnen Werken produzierten Mengen dargestellt werden.

$$SK = M \cdot \sum_j \left(\frac{\sum_a P_j^a}{\sum_{a,b} P_b^a} \cdot H_j^1 \right) + N \cdot \sum_j \left(\sum_a P_j^a \cdot H_j^2 \right) \qquad (2.14)$$

wobei $a = 1,2$ und b über alle j läuft.

Zunächst wird deutlich, daß bereits dieser vereinfachte Sachverhalt zu einer nichtlinearen Funktion führt, da im Nenner des ersten Klammerausdrucks die variable Lohnsumme, d.h. die variablen Werksproduktionsmengen X_{ij} stehen.

Es sei noch kurz angedeutet, in welcher Weise sich Gewerbekapital und -ertrag als Funktionen der Produktionsverteilungen in einem Modell berücksichtigen lassen. (Oben wurde ja vereinfacht unterstellt, daß Gewerbekapital und -ertrag, die in das konstant angenommene M eingehen, von der gewählten Produktionsverteilung unabhängig sind.) Nach den §§8,9 GewStG wird der Gewerbeer-

trag aus dem steuerpflichtigen Gewinn unter Berücksichtigung einiger Hinzurechnungen und Kürzungen ermittelt. Diese Berichtigungen können als entscheidungsunabhängig angesehen werden (vgl. §§8,9 GewStG). Damit kann man vereinfachend schreiben (wobei sich die Beträge jeweils auf das Unternehmen als Ganzes beziehen):

Gewerbeertrag =

(entscheidungsunabhängige) Erlöse
- (entscheidungsunabhängige) Kosten
+ (entscheidungsunabhängige) Zu- und Abrechnungen nach §§8,9 GewStG
- im Modell erfaßte entscheidungsabhängige Kosten

Das heißt: Der Gewerbeertrag ist gleich der Differenz zwischen einer Konstanten und den im Modell verrechneten Kosten. Er läßt sich somit relativ einfach als entscheidungsabhängige Größe in einem Modell berücksichtigen.

Das Ausmaß der Änderung des Gewerbekapitals als Folge unterschiedlich hohen Anlagebedarfs (vgl. hierzu Abschnitt 23) hängt ab, von den Abschreibungen, der Finanzierungsform, dem Einheitswert des Betriebsvermögens (davon hängt ab, ob eine Fortschreibung des Einheitswertes erforderlich ist), dem Zeitpunkt der nächsten Hauptveranlagung. Ein sehr grobes Maß könnte ein Vielfaches der im Abschnitt 23 besprochenen Kosten sein.

Es besteht somit die Möglichkeit, falls der Sachverhalt im konkreten Fall eine große Bedeutung hat, auch den einheitlichen Meßbetrag M nach den Vorschriften der §§ 11 - 14 GewStG als Funktion möglicher Produktionsverteilungen auszudrücken.

225 Die Preise der Produktionsfaktoren

Die Preise der Produktionsfaktoren können abhängen:

1. vom Werkstandort (z.B. beim Faktor Arbeit)
2. von der in einem Werk eingesetzten Menge eines Faktors. Dabei sind der mit steigender Einsatzmenge in einem Werk zwei Fälle zu unterscheiden:
   a) der Fall zunehmender Grenzpreise (oder sinkender Grenzproduktivität) eines Faktors (Oberstundenfall)
   b) der Fall abnehmender Grenzpreise (oder steigender Grenzproduktivität) eines Faktors (z.B. der Fall, daß Rohmateriallieferer auf das einzelne Werk und die Liefermenge im Planungszeitraum bezogene Mengenrabatte gewähren).

Diese Fälle werden in der obigen Reihenfolge diskutiert.

Der Fall 1 läßt sich für Faktoren, deren Kapazität als nur ganzzahlig variierbar im Modell erfaßt wird, in der Formulierung des Abschnittes 23 verarbeiten. Die dort genannten Kostenkoeffizienten C^3_{jp}, die die Kosten einer Einheit des Faktors p (in Geldeinheiten/Faktoreinheit) angeben, werden für die Werke j unterschiedlich gewählt. Ist die Einsatzmenge des Faktors stetig variierbar, so können entsprechende Kostenkoeffizienten C^6_{ij} (in Geldeinheiten/Produktmengeneinheit) zu den Variablen X_{ij} definiert werden.

Der Fall 2a führt auf das Problem der Minimierung konvexer separabler Zielfunktionen, bei denen die Nebenbedingungen eine abgeschlossene konvexe Menge bilden und ebenfalls separabel sind.[1) 2)] Die Faktorkosten (in Geld-

---

[1)] HADLEY,G., Nonlinear and Dynamic Programming, Reading Mass. usw., 1964, S.104 ff.

[2)] DANTZIG,G.B., Lineare Programmierung und Erweiterungen, übers. von JAEGER,A., Berlin usw., 1966, S.534 ff.

einheiten/Planungsperiode) haben hier die nichtlineare Form

$$PK = \sum_{i,j} Q_{ij}(X_{ij}) \qquad (2.15)$$

wobei die $Q_{ij}(X_{ij})$, den in der Abbildung (a) gezeigten Verlauf haben.

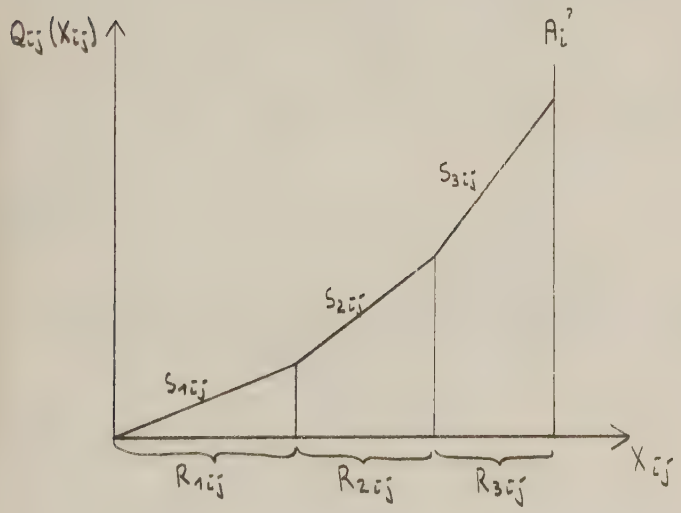

Abb. (a)

Stellvertretend für die Summe der Nebenbedingungen stehe die Nebenbedingung

$$\sum_{j} X_{ij} = A_i^a \qquad \text{für } i=1,\ldots,i^* \qquad (2.16)$$

$$X_{ij} \geq 0 \qquad \text{für } i=1,\ldots,i^*,\ j=1,\ldots,j^* \qquad (2.17)$$

wobei A_i^3 z.B. als Nachfrage nach Produkti(in Produktmengeneinheiten/Planungsperiode) interpretiert werden könnte.

Haben die Funktionen $Q_{ij}(X_{ij})$ nicht ohnehin einen stückweise linearen Verlauf, so werden sie entsprechend linear angenähert.

Die Steigungen der linearen Teilstücke seien S_{cij} (in Geldeinheiten/Produktmengeneinheit). Die dazugehörigen Mengenbereiche seien R_{cij} (in Produktmengeneinheiten/Planungsperiode). Zudem definieren wir Variable V_{cij}, die angeben, welche Produktionsmengen des Produktes i im Werk j im Bereich c realisiert werden (in Produktmengeneinheiten/Planungsperiode). Da für alle i,j gilt

$$S_{1ij} \leq S_{2ij} \leq S_{3ij} \cdot \cdot \cdot \tag{2.18}$$

ist sichergestellt, daß ein Bereich erst dann in Anspruch genommen wird, wenn die links davon liegenden Bereiche voll ausgeschöpft sind. Daher gilt

$$X_{ij} = \sum_c V_{cij} \tag{2.19}$$

$$\text{für } i=1,\ldots,i^*,\ j=1,\ldots,j^*$$

und wir können für die anfallenden Kosten (PK (in Geldeinheiten/Planungsperiode) schreiben:

$$PK = \sum_{cij} W_{cij} \cdot S_{cij} \tag{2.20}$$

wobei

$$0 \leq V_{cij} \leq R_{cij} \tag{2.21}$$

$$\text{für } c=1,\ldots,c^*,\ i=1,\ldots,i^*,\ j=1,\ldots,j^*$$

$$\sum_{cj} V_{cij} = A_i^3 \quad \text{für } i=1,\ldots,i^* \tag{2.22}$$

Der Sachverhalt ist damit in einem linearen Modell erfaßt.[a)]

Der dritte Fall 2b führt auf das Problem der Minimierung konkaver, separabler Zielfunktionen, bei denen die Nebenbedingungen eine abgeschlossene konvexe Menge bilden und ebenfalls separabel sind.

Das Problem kann wiederum mit den Formeln (2.15) bis (2.17) beschrieben werden. Die Funktionen $Q_{ij}(X_{ij})$ haben den in der Abb. (b) gezeigten Verlauf.

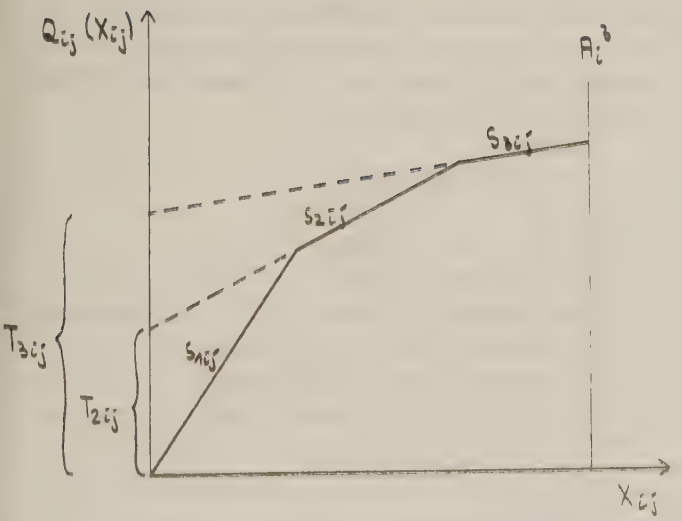

Abb. (b)

1) DANTZIG, G.B., a.a.O., S.549 ff.

Das Problem läßt sich als gemischt ganzzahliges Modell mit Hilfe von 0 - 1 Variablen formulieren. Wir benutzen die folgenden Bezeichnungen:

W_{cij} Menge (in Produktmengeneinheit/Planungsperiode), die vom Produkt i im Werk j gefertigt wird, wenn der Abschnitt c der stückweise linearisierten Funktionen $Q_{ij}(X_{ij})$ realisiert ist.

S_{cij} Steigung des linearen Abschnitts c (in Geldeinheiten/Produktmengeneinheit)

T_{cij} fiktiver Fixkostenbetrag, der anzusetzen ist, wenn der Abschnitt c realisiert wird. (In der Abbildung ist $T_{1ij} = 0$.) (in Geldeinheiten/Planungsperiode)

Z^3_{cij} dimensionslose 0 - 1 Variable, die zur Auswahl nur eines Abschnitts der Kostenkurve und der Zuordnung des zu diesem Abschnitt gehörenden Fixkostenbetrages dient, wobei

$$Z^3_{cij} = \begin{cases} 1 & \text{falls } W_{cij} > 0 \\ 0 & \text{falls nicht} \end{cases}$$

U beliebige Konstante (Dimension: Produktmengeneinheit/Planungsperiode), die so groß ist, daß die Nebenbedingungen, in der sie verwendet wird, den Lösungsbereich anderer Nebenbedingungen nicht verkleinern.

Die zu verrechnenden Kosten PK' (in Geldeinheiten/Planungsperiode) sind

$$PK' = \sum_{cij} (S_{cij} W_{cij} + T_{cij} \cdot Z^3_{cij}) \qquad (2.23)$$

Für die Entscheidungsvariablen W_{cij} gilt

$$W_{cij} \geq 0 \qquad (2.24)$$

$c=1,\ldots,c^*,\ i=1,\ldots,i^*,\ j=1,\ldots,j^*$

Sobald ein $W_{cij} > 0$, muß das zugehörige $Z^3_{cij} = 1$ gesetzt werden. Dies erreichen die folgenden Nebenbedingungen:

$$W_{cij} \leq U \cdot Z^3_{cij} \tag{2.25}$$

für $c=1,\ldots,c^*$, $i=1,\ldots,i^*$, $j=1,\ldots,j^*$

$$0 \leq Z_{cij} \leq 1 \text{ und ganzzahlig} \tag{2.26}$$

für $c=1,\ldots,c^*$, $i=1,\ldots,i^*$, $j=1,\ldots,j^*$

Nur ein Abschnitt der Kurve $Q_{ij}(X_{ij})$ darf realisiert sein:

$$\sum_c Z^3_{cij} = 1 \tag{2.27}$$

für $i=1,\ldots,i^*$, $j=1,\ldots,j^*$

Die vom Produkt i im Werk j produzierte Menge X_{ij} ist:

$$\sum_c W_{cij} = X_{ij} \tag{2.28}$$

für $i=1,\ldots,i^*$, $j=1,\ldots,j^*$

Die Nebenbedingungen (2.16) können, falls die Gleichungen (2.28) nicht in das Modell aufgenommen werden, umgeschrieben werden.

$$\sum_{cj} W_{cij} = A^3_i \tag{2.29}$$

für $i=1,\ldots,i^*$

Entsprechende Formulierungen finden sich bei EFROYMSON, RAY[1], SPIELBERG[2], WHITE[3], DAVIS, RAY[4] .

---

[1] EFROYMSON,M.A., RAY,T.L., A Branch-Bound Algorithm for Plant Location, in: Operations Research, Vol.14, No.3, 1966, S.361-368

[2] SPIELBERG,K., Algorithms for the Simple Plant Location Problem with Some Side Conditions, in: Operations Research, Vol.17, No.1, 1969, S.85-111

[3] WHITE,D.H., Production Allocation with set-up Penalties and Concave Material Costs, in: Operations Research, Vol.17, No.6, 1969, S.958-972

[4] DAVIS,P.S., RAY,T.L., A Branch-Bound Algorithm for the Capacitated Facilities Lacation Problem, in: Naval Research Logistics Quarterly, Vol.16, No.3, 1969, S.331-344

3. FORMULIERUNG UND LÖSUNG EINES GEMISCHT-GANZZAHLIGEN MODELLS

31 Ein gemischt-ganzzahliges Modell als Zusammenfassung wichtiger Teilaspekte

Der vorhergehende Abschnitt (2) hat an einigen Sachverhalten gezeigt, daß sich Kosten als Funktion alternativer, im Rahmen einer gegebenen Umwelt realisierbarer Produktionsverteilungen im wesentlichen mit Hilfe einer gemischt-ganzzahligen Formulierung darstellen lassen. (Eine Ausnahme bildet der im Abschnitt 224 beschriebene Steuersachverhalt.) Die beschriebenen Strukturen umfassen die in der durchgesehenen Literatur zum "Production Allocation Problem" vorgeschlagenen Modellstrukturen. Die ersten Modelle zu diesem Problem sind lineare Modelle. HADLEY[1] formuliert ein Einprodukttransportmodell, bei dem die Transportkoeffizienten neben Transportkosten auch Produktionskosten beinhalten. Er setzt dabei Produktionskosten voraus, die lineare Funktionen der in einem Werk produzierten Mengen der einzelnen Produkte sind. Modelle, die Produktionskosten als nichtlineare Funktionen der in den einzelnen Werken produzierten Mengen annehmen, sowie Modelle, die mehrere Produkte berücksichtigen, finden sich insbesondere bei GRUNDMANN[2]. Zudem ist hinzuweisen auf Aufsätze zu dem verwandten "Plant-Location" Problem in der Zeitschrift Operations Research, insbesondere die bereits im vorhergehenden Abschnitt 225 angegebenen Aufsätze von RAY, SPIELBERG, DAVIS und RAY und den Aufsatz von WHITE, der sich mit dem hier interessierenden "Production Allocation" Problem

---

1) Vgl. z.B. HADLEY,G., Linear Programming, Reading usw. 1962, S.431 ff., insbesondere die dort beschriebene Fallstudie S.433-437

2) Vgl. GRUNDMANN,W. und andere, Mathematische Methoden zur Standortbestimmung, Berlin, 1967

befaßt. Man könnte nun daran denken, die Gesamtheit der im Abschnitt 2 modellierten Sachverhalte zusammenzufassen und das Ganze als allgemeines Entscheidungsmodell für das behandelte Problem zu bezeichnen. Der Kritiker wird dann aber zurecht auf den beträchtlichen Modellumfang und die Schwierigkeiten bei der Optimierung hinweisen. Auf der anderen Seite wird er unschwer aus seinen Erfahrungen auf Sachverhalte hinweisen, die nicht oder zu grob erfaßt sind. Selbst wenn wir annehmen, daß die einzelnen Teilmodelle die Wirklichkeit eines Falles zwar vereinfacht aber nicht falsch wiedergeben, ist die unkritische Zusammenfassung der Teile kaum ein gutes Entscheidungsmodell. Anzustreben ist ein Entscheidungsmodell, das bei seiner Anwendung die Differenz zwischen den möglichen Einsparungen bei den entscheidungsabhängigen Kostenarten und den durch das Modell verursachten Kosten, d.h. den Kosten der Modellformulierung, der Datenbeschaffung und Optimierung, maximiert. Hier ist zu beachten, daß bei gemischt-ganzzahligen Modellen der Lösungsaufwand nicht linear mit der Zahl der ganzzahligen Variablen wächst, sondern je nach Art der Restriktionen annähernd exponentiell. Wir erreichen relativ schnell einen Modellumfang, für den das Auffinden einer guten Lösung mit den vorhandenen Methoden sehr aufwendig wird. Zur Untersuchung eines konkreten Falles ist es daher notwendig, weniger wichtige Tatbestände — insbesondere wenn ihre Erfassung zu nicht-linearen Modellteilen führen würde — entweder nicht oder zumindest vereinfacht, d.h. in der Regel linearisiert, zu erfassen. Somit sind es die Daten des Einzelfalles wie: Gewicht und Volumen der Produkte, das Lohngefälle zwischen den Standorten, die Maschinen- bzw. Arbeitsintensität der Fertigung, die die Struktur des Entscheidungsmodells letztlich bestimmen. Deshalb wenden wir uns nach einer kurzen Beschreibung der Lösungsmöglichkeiten im Abschnitt 32 einem konkreten Fall zu.

32 Wege zum Auffinden einer "guten" Lösung eines Modells mit der beschriebenen Struktur

321 Exakte Lösungsverfahren

"Although many talented individuals have actively researched the field, and although a great many algorithms for the solution of integer linear programming problems have been proposed, only a handful has been transformed into actual working computer programs and of this handful, a still smaller set has been proven useful for the solution of practical problems."[1] Zur Zeit können Probleme mit zwischen 20 und 40 ganzzahligen Variablen gelöst werden.[2]

In der Literatur werden zur Lösung von Problemen, die dem unseren ähnlich sind, ausschließlich Algorithmen vom Branch-Bound Typ vorgeschlagen. Die Bemühungen konzentrieren sich dabei einmal darauf die Rechenzeit zur Lösung des für jeden Knoten des Entscheidungsbaumes anfallenden linearen Problems zu verringern. Efroymson, Ray[3] und Spielberg[4] behandeln das "uncapacitated plant-location-problem", bei dem die Lösungen der anfallenden, linearen Programme trivial sind und daher schnell ermittelt werden können. White[5] schlägt vor, Programme zu entwickeln, die den Zugriff zu vorhandenen, sehr effizienten Programmen zur Lösung linearer Probleme, wie z.B. dem von IBM entwickelten MPS/360, erlauben.

---

1) Driebeek, N.J., Applied Linear Programming, Reading, Massachusetts, usw. 1969, S.127

2) Ebd., S. 129

3) Vgl. Efroymson, M.A., Ray, T.L., a.a.O., S.361

4) Vgl. Spielberg, K., a.a.O., S.85

5) Vgl. White, C.H., a.a.O., S.971

Zum anderen wird versucht, die Zahl der zu untersuchenden Knoten des Entscheidungsbaumes dadurch klein zu halten, daß abhängig von den jeweiligen Daten bereits bei einer relativ guten Lösung begonnen wird.[1] (SPIELBERG S.109).

322 Heuristische Verfahren

Das Ziel der von KÜHN, HAMBURGER[2] und FELDMAN[3] entwickelten heuristischen Verfahren zur Lösung ähnlicher Probleme ist ebenfalls, die Zahl der zu untersuchenden Knoten eines Entscheidungsbaumes klein zu halten. Bei dem von FELDMAN vorgeschlagenen"Drop Approach" wird praktisch nur ein Zweig des Baumes verfolgt. Entscheidungsregeln sorgen dafür, daß nach der Untersuchung eines Knotens ein möglichst guter Zweig als Fortsetzung des Verfahrens gewählt wird. Das Lösungsverfahren ist schnell, da weniger Knoten untersucht werden, und es verbraucht weniger Speicherplatz als Branch-Bound Verfahren, da die nicht fortgesetzten Zwischenlösungen, die möglicherweise zum wahren Optimum führen, vergessen werden. Das Verfahren führt nicht notwendig zu einem globalen Optimum.

Wenn man gut erscheinende Konstellationen der ganzzahligen Variablen direkt durch Überlegung festlegt, ist die Zahl der zu untersuchenden Knoten noch weiter eingeengt. Ein solches Verfahren wurde bei der französischen Ölstudie[4] angewandt.

---

1) Vgl. SPIELBERG,K., a.a.O., S.109

2) KÜHN,A., HAMBURGER,M.J., A Heuristic Program for Locating Warehouses, in: Management Science, Vol.9, No.4, 1963, S.643-666

3) FELDMAN,E., LEHRER,F.A., RAY,T.L., Warehouse Location under Continuous Economies of Scale, in: Management Science, Vol.12, No.9, 1966, S.670-684

4) Vgl. HANSSMANN,F., a.a.O. S.66 f.

Heuristisch ist auch das Verfahren, das wir zur Lösung des im folgenden beschriebenen Falles anwenden. Wir werten ein gemischt ganzzahliges Grobmodell aus, wobei die Vergröberung des Sachverhaltes sich auf den sehr umfangreichen, linearen Transportteil des feineren Modells bezieht. Das Ziel ist dabei, die Rechenzeit zur Lösung der linearen Probleme zu verringern. Gute Lösungen des Grobmodells werden festgehalten und bilden die Knoten, die anschließend mit Hilfe des feineren Modells exakter untersucht werden.

4. ENTWICKLUNG DES ENTSCHEIDUNGSMODELLS FOR EINEN KONKRETEN FALL

41 Beschreibung des Unternehmens

Das Unternehmen stellt Kunststoffrohre aus PVC - hart her. Nach dem Verwendungszweck der Rohre unterscheidet man 5 Hauptrohrtypen: Abflußrohre, Kanalrohre, Druckrohre, Dachrinnen und Dränrohre.

Jeder Rohrtyp wird in verschiedenen Weiten, die Rohre außerdem in verschiedenen Längen hergestellt. Diese Untergliederung führt zu einer großen Produktvielfalt,z.B. lassen sich beim Abflußrohr sechs Weiten mit neun verschiedenen Längen unterscheiden.

Der Begriff Rohrtyp soll die Gesamtheit z.B. der Abflußrohre umfassen. Der Begriff Rohrart bezieht sich dagegen auf eine Untergliederung der Rohrtype z.B. nach Weiten.

Das Unternehmen beliefert die gesamte BRD. Das Gesamtgebiet ist in 16 Absatzgebiet aufgeteilt. In jedem Bezirk wird der Vertrieb durch einen oder zwei Vertreter besorgt.

Es sind zwei Werke vorhanden, deren Standorte über 600km auseinanderliegen.

Notwendig ist zunächst eine kurze Darstellung der bei der Rohrherstellung angewandten Produktionstechnik. Die Rohre werden auf sogenannten Rohrstraßen gefertigt, die aus einem Extruder, Wasserbad, Signiergerät, einer Säge und einem Abzug bestehen. Das gemischte Rohrmaterial wird im Extruder erhitzt, bis es zu einer teigigen Masse wird, und dann durch Schnecken aus dem Extruder durch einen entsprechenden Düsensatz in die gewünschte Rohrform gepreßt. Das Rohr wird im Wasserbad abgekühlt, signiert, in der gewünschten Länge abgesägt und dann durch den Abzug von der Rohrstraße gerollt. Die meisten Rohre werden anschließend mit einer Muffe versehen.

Dieses Herstellungsprinzip ist bei allen Rohrtypen das gleiche. Trotzdem ergibt sich eine weitgehende Zuordnung der Rohrarten zu bestimmten Extrudertypen:

1. wegen der Rohrweitenunterschiede

   Je höher die Ausstoßleistung eines Extruders, gemessen in Gewichtseinheiten pro Zeiteinheit, ist, umso wirtschaftlicher kann eine bestimmte Rohrmenge, gemessen in Gewichtseinheiten, hergestellt werden. Das führt dazu, Extruder mit möglichst hoher Ausstoßleistung einzusetzen. Dem steht jedoch entgegen, daß die Ausstoßgeschwindigkeit des Rohres aus dem Extruder, gemessen in Längeneinheiten pro Zeiteinheit, begrenzt ist, wenn gewisse Qualitätsforderungen eingehalten werden sollen. Würde man kleine Rohrweiten auf Extrudern mit hoher Ausstoßleistung produzieren, dann könnte diese Ausstoßleistung nicht voll genutzt werden, weil sonst die Ausstoßgeschwindigkeit zu hoch würde. Das Unternehmen ist sowohl mit Extrudern hoher als auch mit Extrudern geringerer Ausstoßleistung ausgerüstet. Für die kleineren Weiten werden Extruder mit geringerer Ausstoßleistung eingesetzt und damit wird eine schlechte Kapazitätsausnutzung der Extruder mit hoher Ausstoßleistung vermieden. Diese Extruder werden nur für die großen Rohrweiten eingesetzt.

2. wegen der unterschiedlichen Qualitätsanforderungen an die einzelnen Rohrtypen

   Die moderneren Extruder werden zur Produktion der Rohrtypen benutzt, für die die Qualitätsanforderungen besonders hoch sind.

42 Die Problemstruktur, der Entscheidungszeitraum und das Entscheidungskriterium

Dieser Abschnitt soll insbesondere klären:

1. ob eine statische Betrachtung sinnvoll ist und
2. ob die Annahme eines von der Verteilung der Produktion auf die beiden Werke unabhängigen Absatzmengenprogramms zulässig ist.

Beide Fragen lassen sich nur unter Bezugnahme auf Daten beantworten. Im Abschnitt 1 haben wir festgestellt, daß statische Modelle nur dann in der Weise hintereinander geschaltet werden können, daß man von einem Zustand ohne längeren Obergangsprozeß zum nächsten springt, wenn

1. die Kosten der Systemumstellung relativ zu den im Betrachtungszeitraum erreichbaren Kosteneinsparungen vernachlässigbar klein sind und
2. um ein entsprechend günstiges Verhältnis der beiden Kostenkomponenten zu erreichen, der Betrachtungszeitraum nicht so lang gewählt werden muß, daß die Annahme einer stationären Umwelt für diesen Zeitraum nicht mehr aufrecht erhalten werden kann.

Die Festlegung eines Optimierungszeitraums von mehreren Jahren (z.B. 5 Jahren) ließe insbesondere aufgrund der zu erwartenden Absatzentwicklung die Anwendung eines statischen Modells im obigen Sinne nicht zu:

1. Die Unternehmen, die Kunststoffrohre herstellen, sind verhältnismäßig jung. Das bedeutet, daß
   a) die Produkte noch fortlaufend verbessert werden oder durch Neuentwicklung ersetzt werden,
   b) für bereits bestehende Produkte neue Verwendungsmöglichkeiten gefunden werden,
   c) der Einbruch in die althergebrachten Märkte der Guß-, Asbestzement- und Tonrohrindustrie noch nicht abgeschlossen ist.
2. Der Absatz der Unternehmen ist von der Bautätigkeit stark abhängig. Gerade die Bauindustrie wird aber von der Wirtschaftspolitik, insbesondere der Konjunkturpolitik, des Bundes und der Länder stark beeinflußt.
3. Die regionale Absatzverteilung innerhalb der BRD wird von der Wirtschaftspolitik der Länder und insbesondere der Gemeinden beeinflußt.

Die Festlegung eines besonders kurzen Entscheidungszeitraums (z.B. 1 Monat) wirft in Bezug auf die Annahme einer

stationären Umwelt keine Probleme auf. Dafür sind die Systemumstellung und die dabei anfallenden Kosten umso problematischer. Die Kosten einer Systemumstellung könnun für einen so kurzen Entscheidungszeitraum nur dann vernachlässigt werden, wenn sich die Umstellung im Rahmen der Kapazitäten der in den einzelnen Werken vorhandenen Rohrstraßen bewegt. Die im Abschnitt 41 beschriebene Produktionstechnik läßt es im beschränkten Umfang zu, verschiedene Rohrarten auf den gleichen Rohrstraßen zu fertigen. Die Umstellung auf eine andere Produktion ist dabei mit geringen Kosten verbunden. Betrachtet man aber nur diese Möglichkeit einer Produktionsumverteilung, so ist der Entscheidungsspielraum doch sehr eingeengt, weil die Kapazitätsbreite der Rohrstraßen klein ist. Wir werden diese Anwendungsmöglichkeit eines statischen Modells für eine kurzfristige Optimierung daher nicht verfolgen, obwohl bei entsprechender Rationalisierung, insbesondere der Datenerfassung, auch diese kurzfristige Optimierung lohnend sein könnte. Stattdessen soll ein erweiterter Entscheidungsspielraum betrachtet werden, der die Möglichkeit einschließt, Rohrstraßen von einem Werk in ein anderes umzustellen. Damit fallen jedoch die Möglichkeiten und Kosten der Systemumstellung stärker ins Gewicht und die Berücksichtigung eines längeren Entscheidungszeitraums wird notwendig. Aufgrund der im folgenden zu erläuternden, speziellen Struktur des Falles ist ein statisches Modell auch hier brauchbar.

1. Der Absatz des Unternehmens ist von der saisonal schwankenden Tätigkeit der Bauindustrie stark abhängig. Diese Absatzschwankungen werden durch Lageraufund -abbau nur teilweise ausgeglichen, so daß im Saisontief des Winters die Rohrstraßenkapazitäten nur teilweise ausgelastet sind.

2. Die Umstellung einer Rohrstraße von einem Werk in ein anderes führt zu einem mehrwöchigen Produktionsausfall, der, wenn er sich zu einem entsprechenden Absatzausfall bzw. zu einem Mehrbedarf an Kapazität fortpflanzt, in den Systemumstellungskosten berücksichtigt

werden müßte. Diese Mehrkosten sind hoch genug, um eine Umstellung in der Zeit der Vollauslastung der Kapazität auszuschließen. Umstellungen werden kostengünstig nur im Saisontief durchgeführt.

3. Im Saisontief sind die Kosten, die bei der Umstellung einer Rohrstraße anfallen, relativ zu den Kostenveränderungen, die innerhalb eines Jahres durch eine Produktionsumverteilung eintreten können, gering:

   a) Es tritt kein Produktionsausfall auf.

   b) Die zum Auf- und Abbau der Anlagen notwendigen Vorrichtungen sind ohnehin in den Werken vorhanden.

   c) Einer Umstellung müssen nur dann Lohnkosten zugerechnet werden, wenn die Zahl der Arbeitskräfte entsprechend dem Produktionsrückgang im Saisontief abgebaut wird. Werden keine Arbeitskräfte eingespart — das wird im Falle einer angespannten Arbeitsmarktlage die Regel sein — , dann können unterbeschäftigte Arbeitskräfte den Auf- und Abbau besorgen, ohne daß zusätzliche Lohnkosten anfallen.

   d) Als der einzelnen Umstellung sicher zurechenbare Kosten bleiben lediglich die Transportkosten für den Werk zu Werk Transport der Rohrstraße.

4. Da im Werk 2 ohnehin wegen der begrenzten Fertigungshallenfläche nur je nach Rohrstraßentyp 4 bis 7 Rohrstraßen aufgestellt werden können und im extremsten Fall ein Austausch aller Rohrstraßen des Werkes 2 erfolgen kann, ist die Zahl der maximal möglichen Umstellungen als Folge einer Optimierung klein.

Die zahlenmäßige Auswertung dieser Gesichtspunkte ergab, daß gemessen an den zu erwartenden Kosteneinsparungen als Folge von Produktionsumverteilungen pro Jahr, Umstellungskosten relativ unbedeutend sind.

Wir halten fest: Für einen Entscheidungszeitraum von einem Jahr können, wenn die notwendigen Systemanpassungen für die jeweilig folgende Periode im Saisontief vorgenommen werden, günstige Verteilungen der Produktion

auf beide Werke mit Hilfe eines statischen Modells ermittelt werden.

Als nächstes ist zu prüfen, ob die erreichbaren Absatzmengen von der Verteilung der Produktion auf die Werke abhängen. Bereits im Abschnitt 1 haben wir zu dieser Frage grundsätzliche Überlegungen beschrieben. Da sich das Unternehmen auf die Belieferung des gesamten Gebietes der BRD eingestellt hat, könnte eine solche Abhängigkeit aus zwei Gründen bestehen:

1. Durch unterschiedlich lange Lieferzeiten von den beiden Werkstandorten. Eine quantitative Untersuchung dieser Frage scheitert an fehlendem Datenmaterial. Zunächst ist zu bedenken, daß nur der kleinere Teil der Lieferzeiten auf die Transportzeiten entfällt. Der größere Teil wird durch mangelnde Lieferbereitschaft des Unternehmens verursacht. Des weiteren ist es problematisch, aus den Absatzzahlen der Vergangenheit auf einen höheren Absatz in Werksnähe schließen zu wollen. Die Zahlen werden stärker durch andere Ursachen, wie der Fähigkeit eines Vertreters oder der Bautätigkeit in dem entsprechenden Gebiet beeinflußt. Da zudem Fachleute des Unternehmens diesem Gesichtspunkt keine besondere Bedeutung beimessen, wird auf die Berücksichtigung von Nachfrageänderungen als Folge von Änderungen der Transportwege verzichtet.

2. Durch eine sich ändernde Lieferbereitschaft. Bei der Aufteilung der Produktion einer Rohrart auf mehrere Werke könnte es zu einer Verschlechterung der Lieferbereitschaft kommen, wenn die Märkte, die von den einzelnen Werken zu beliefern sind, ein für allemal festgelegt wären. Das ist aber nicht so. Auch wenn festgelegt wird, daß ein bestimmter Absatzbezirk von einem bestimmten Werk beliefert werden soll, schließt das nicht aus, daß, falls dieses Werk nicht liefern kann, von einem anderen Werk geliefert wird. Da insgesamt die gleiche Menge produziert und auch gelagert wird, ändert sich die Lieferbereitschaft des Gesamt-

unternehmens nicht. Die Kostennachteile, die dadurch entstehen, daß von einem standortmäßig ungünstigen Werk geliefert wird, werden gering sein, da man das liefernde Werk für die Bezirke ändern wird, für die der Kostenunterschied bei Lieferung von dem einen oder anderen Werk am geringsten ist. Dem Nachteil der Verschlechterung der Lieferbereitschaft des *einzelnen* Werkes kommt daher keine wesentliche Bedeutung zu.

Wenn sich die Absatzmengen als von der Produktionsverteilung auf beide Werke unabhängig betrachten lassen, und gegebene Preise vorausgesetzt werden, so sind die Erlöse vorgegeben und daraus ergibt sich wiederum, daß ein Kostenkriterium ausreichend ist. Das Entscheidungskriterium des Modells soll die Summe der in einem Jahr anfallenden Kosten der wichtigsten Kostenarten sein, die im Hinblick auf die möglichen Entscheidungsalternativen variabel sind.

43 Die in das Modell aufzunehmenden Sachverhalte

Alternativen, das sind alternative Produktionsverteilungen auf die beiden Werke, müssen so beschrieben werden, daß

1. ihre Zulässigkeit mit Hilfe von geeigneten Restriktionen getestet werden kann und
2. sie im Hinblick auf das Entscheidungskriterium, d.h. im Hinblick auf die entscheidungsabhängigen Kosten, bewertet werden können.

Bevor wir daher im Modellaufbau mit der Definition von Entscheidungsvariablen zur Beschreibung der Alternativen fortschreiten, ist es notwendig, die Grenzen des zulässigen Raumes, des Entscheidungsfeldes, zu beschreiben und die Kostenarten zu ermitteln, die in der Zielfunktion Berücksichtigung finden sollen. Hierzu dienen die Abschnitte 431 und 432.

431 Die Grenzen des Entscheidungsfeldes

Die Grenzen des Entscheidungsfeldes sind:

1. die zu erwartende Rohrnachfrage

   Nach welchen Gesichtspunkten und wie detailliert die Nachfrage gegliedert werden muß, hängt davon ab, welche Kostenarten im Modell berücksichtigt werden sollen. Wenn Transportkostenüberlegungen im Modell eine Rolle spielen, so ist je nach der Bedeutung des Sachverhaltes eine Gliederung der zu erwartenden Rohrabsatzmenge nach Absatzpunkten und Bestellgewohnheiten (d.h. nach Auftragszusammensetzungen und Bestellmengen) notwendig.

2. die Kapazität der im Entscheidungszeitraum vorhandenen Rohrstraßen getrennt nach Rohrstraßentyp

   Im Unternehmen wurden von jeher Absatzzahlen für das jeweils folgende Kalenderjahr geschätzt, und die Kapazität entsprechend dieser Schätzung ausreichend geplant. Damit ist die Gesamtkapazität aller Rohrstraßen für die zu erwartenden Absatzmengen kein Engpaß. Die Restriktionen, die trotzdem angesetzt werden müssen, beziehen sich vielmehr darauf, daß die Produktion der Rohrarten, die auf mehr als nur einem Rohrstraßentyp gefertigt werden können, entsprechend den vorhandenen Kapazitäten auf die einzelnen Rohrstraßentypen verteilt wird.

3. die Fertigungshallengrößen

   Die Fertigungshallengrößen sind eine wichtige Grenze für die Rohrmenge, die in einem Werk gefertigt werden kann. Die Rohrmenge ist allerdings nicht unmittelbar von der Hallengröße abhängig. Die Hallengröße bestimmt zunächst die Zahl der Rohrstraßen, die von den einzelnen Rohrstraßentypen aufgestellt werden können. Die unterschiedlichen Kapazitäten dieser aufgestellten Rohrstraßen bestimmen dann die Rohrmengen, die in dem jeweiligen Werk gefertigt werden können. Wie groß

diese Rohrmenge ist, hängt somit außer von der Fertigungshallengröße auch von den Rohrstraßentypen ab, die sich unterscheiden durch:

a) ihre unterschiedliche Eignung zur Produktion bestimmter Rohrarten,

b) ihre unterschiedliche Kapazität,

c) unterschiedlichen Platzbedarf pro Rohrstraße.

4. die Lagerflächen

Die Lagerfläche eines Werkes ist, bei gegebener Lagerpolitik, im Rahmen des verhältnismäßig kurzen Entscheidungszeitraums nicht veränderlich und damit eine Grenze für die Rohrmenge, die in einem Werk gelagert werden kann.

5. die Mischerkapazitäten

Die Kapazität der Rohmaterialmischanlage eines Werkes ist eine mögliche Grenze für die Rohrmenge, die in diesem Werk gefertigt werden kann, weil sie ebenfalls im Rahmen einer einjährigen Betrachtung nicht variabel ist.

Festzuhalten ist insbesondere, daß die angegebenen Grenzen des Entscheidungsfeldes, d.h. die Absatzmengen auf der einen und die Werkskapazitäten auf der anderen Seite, eine Konzentration der Produktion auf nur ein Werk nicht zulassen.

432 Die zu berücksichtigenden Kostenarten

Welche Kostenarten und in welchem Detail diese in das Modell eingehen sollen, kann nur nach Einsicht in Daten entschieden werden.

4321 Materialbeschaffungskosten

Die zur Produktion notwendigen Rohmaterialien bezieht die Unternehmung von mehreren Chemiewerken. Es ist zu untersuchen, ob die Materialbeschaffungskosten beider

Werke unterschiedlich sind. Etwaigen Unterschieden käme insbesondere deswegen Bedeutung zu, weil es sich bei den Rohstoffen um Gewichtsverlustmaterial handelt, d.h. zur Produktion werden mehr Rohstoffe benötigt, als im Endprodukt enthalten sind. Aus dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial ergibt sich zunächst, daß die Lieferungen generell frei Haus erfolgen und besondere Bezugskosten nicht anfallen. Die Materialpreise sind, zumindest rein äußerlich, vom Standort des beziehenden Werkes unabhängig. Die liefernden Chemiewerke tragen die Unterschiede in den Transportkosten, die ohne Zweifel bestehen, indem sie unterschiedliche Gewinnspannen in Kauf nehmen.

Es bestehen jedoch Unterschiede in den Materialpreisen der einzelnen Lieferer. Aus Gründen der Risikoverteilung werden diese – recht kleinen – Unterschiede allerdings in Kaufgenommen und es wird weiterhin auch von den etwas teuereren Lieferern bezogen. Es gibt jedoch Anlass zu fragen, ob diese Unterschiede nicht darauf zurückzuführen sind, daß die Chemiewerke bei der Festsetzung ihrer Rabattsätze bereits berücksichtigen, welche Transportkosten ihnen bei Lieferung an ein bestimmtes Werk entstehen. Gerade bei Großabnehmern ist es naheliegend, daß eine solche Kalkulation aufgestellt wird. Das braucht, für den Fall, daß mehrere Werke vorhanden sind, nicht zu einer Preisdifferenzierung von Werk zu Werk zu führen. Die voraussichtlichen, durchschnittlichen Lieferkosten könnten vielmehr vom Lieferer durch Gewichtung der Lieferkosten pro Mengeneinheit mit den zugehörigen, voraussichtlichen Liefermengen zu den einzelnen Werken geschätzt werden. Aber auch auf eine solche Abhängigkeit läßt das vorliegende Datenmaterial nicht schließen.

Materialbeschaffungskosten werden somit nicht in der Zielfunktion berücksichtigt.

4322 Transportkosten der Fertigprodukte

Ab bestimmten, für jede Rohrtype verschieden festgelegten Mindestauftragswerten trägt das Unternehmen die Transportkosten der abgesetzten Produkte.

Ein Überblick über die Bedeutung der Transportkosten für die Bewertung zulässiger Alternativen läßt sich bereits durch Bewertung extremer Alternativen gewinnen. Da die Gesamtnachfrage jeder Rohrtype auf das gesamte Gebiet der BRD verteilt ist und beide Werke innerhalb dieses Gebietes und weit auseinanderliegen, sind von den Transportkosten her gesehen solche Alternativen besonders vorteilhaft, die eine Lieferung jeder Rohrtype von beiden Werken vorsehen. Besonders ungünstig sind dagegen Alternativen, die Lieferungen der einzelnen Rohrarten von jeweils nur einem Werk vorsehen. Der Vergleich der aufgrund tatsächlicher Daten berechneten Transportkosten für diese extrem gegensätzlichen Teilalternativen zeigt, daß bei der Bewertung der Alternativen dem Transportgesichtspunkt entscheidende Bedeutung zukommen muß. Eine besonders detaillierte Erfassung der mit dem Transport zusammenhängenden Sachverhalte ist angebracht.

4323 Kapazitätskosten

Produktionsfaktoren, die aufgrund geringer Teilbarkeit ihrer Kapazität und als Folge alternativer Verteilung der Produktion auf zwei Werke in unterschiedlicher Zahl benötigt werden, sind der Faktor Betriebsmittel und der Faktor Arbeit. Ein Großteil der Ausstattung beider Werke ist, da das gegebene Entscheidungsfeld die Konzentration der Produktion auf nur ein Werk nicht erlaubt, unvermeidbar. Dies gilt insbesondere für:

1. die Werksleitungen, einschließlich Produktionsplanung, - organisation und Produktionskontrolle,
2. die Werksverwaltung (z.B. das Lohnbüro),

3. die Hilfsbetriebe (z.B. Instandsetzungsabteilung, Stromversorgung).

Inwieweit sich der Ganzzahligkeitsgesichtspunkt auf die Bewertung zulässiger Alternativen auswirkt, hängt ab:

1. von der Teilbarkeit der Faktorkapazitäten relativ zu ihrer Einsatzmöglichkeit. Hierzu einige Beispiele:

   a) Es wurde bereits erwähnt, daß die gewünschte Rohrform durch einen entsprechenden Düsensatz erzeugt wird. Für jede Rohrweite jeder Rohrtype ist ein besonderer Düsensatz notwendig. Die Kapazität des Düsensatzes hängt weitgehend von der Kapazität des verwendeten Extruders ab. Die angenommenen Daten seien:

   Extruderleistung: 40 to/Monat,
   zu produzierende Menge einer bestimmten Rohrart:
   30 to/Monat.

   Wenn die Rohrart nur in einem Werk gefertigt wird, reicht ein Düsensatz zur Produktion der gewünschten Menge aus, da ein Extruder bereits die nötige Leistung bringt. Die Leerkapazität des Düsensatzes beträgt 10 to/Monat.

   Wird die Produktion dieser 30 to/Monat jedoch zu gleichen Mengen auf zwei Werke aufgeteilt, dann müssen zwei Düsensätze vorhanden sein. Die Leerkapazität jedes Düsensatzes beträgt 25 to/Monat.

   Bei der Aufteilung der Produktion einer Rohrart auf verschiedene Werke entsteht ein Mehrbedarf an Düsensätzen nur dann nicht, wenn
   - die Produktionsmenge einer Rohrart so groß ist, daß mehrere Düsensätze auch bei Produktion in nur einem Werk notwendig sind und gleichzeitig
   - die Produktionsaufteilung auf verschiedene Werke so vorgenommen wird, daß sie mit der Teilbarkeit der Düsensatzkapazität der Rohrart übereinstimmt.

   Dies wird am Beispiel b) deutlich.

b) Die angenommenen Daten seien:

Extruderleistung: 40 to/Monat,
zu produzierende Menge einer bestimmten Rohrart:
60 to/Monat.

Bei Produktion in einem Werk sind zwei Düsensätze notwendig. Alle Produktionsaufteilungen auf zwei Werke,, die innerhalb des Bereiches 20 bis 40 to/Monat für beide Werke liegen, sind ohne zusätzlichen Düsensatz möglich.

c) Während die Düsensätze nur zur Produktion einer Rohrweite geeignet sind, können die Extruder innerhalb eines gewissen Rohrweiten- und -typenspielraums für mehrere Rohrarten eingesetzt werden. Hinzu kommt, daß sich die Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Extrudertypen überschneiden. Leerkapazitäten, als Folge von Produktionsumverteilungen, treten für jedes Werk nur beim jeweilig letzten Extruder auf. Ihre Bedeutung ist daher gering.

d) Die zur Produktion notwendigen Arbeitskräfte sind zum größten Teil angelernte Arbeiter, die, falls sie nicht voll ausgelastet sind, zu anderen Arbeiten eingesetzt werden können. Der Ganzzahligkeitsgesichtspunkt hat somit für Arbeitskräfte geringe Bedeutung.

2. Von den Kosten einer Einheit der nur ganzzahlig variierbaren Faktoren.

Diese Kosten setzen sich zusammen aus Abschreibungen und Zinsen der entsprechenden Geräte, wobei die Abschreibung zeitbedingte Abschreibung ist. (Wenn man nur eine Abschreibung für den der produzierten Rohrmenge proportionalen technischen Verschleiß gelten lassen will, entfällt der Ganzzahligkeitsgesichtspunkt.) Ein besonderes Problem bildet bei der Ermittlung der Kosten die Wahl der Abschreibungsmethode und -dauer, sowie die Wahl des Kalkulationszinsfußes.

Legt man der Untersuchung der infrage kommenden Faktoren diese Gesichtspunkte zugrunde, so zeigt sich, daß insbesondere die teueren Spezialwerkzeuge: DÜsensätze und Muffgeräte erfaßt werden müssen.

4324 Gewerbesteuer

Im Abschnitt 25 haben wir festgestellt, daß unterschiedliche Produktionsaufteilungen die Gewerbesteuerbelastung des Unternehmens insbesondere dann beeinflußen, wenn die Hebesätze der berechtigten Gemeinde unterschiedlich hoch sind und sich durch die Produktionsumverteilung das Lohnsummenverhältnis zwischen den Werken ändert. Selbst wenn beträchtliche Hebesatzunterschiede entstehen, ist der Sachverhalt nur dann von Bedeutung, wenn im Rahmen möglicher Produktionsumverteilungen eine starke Änderung des Lohnsummenverhältnisses zwischen den Werken möglich ist. Bedeutende Änderungen sind aber nur dann zu erwarten, wenn

- die Arbeitsintensität der Fertigung der einzelnen Produkte große Unterschiede aufweist und
- der Anteil der Beschäftigten, der unabhängig von der zu treffenden Entscheidung in den einzelnen Werken vorhanden sein muß, an der Gesamtzahl der im Unternehmen Beschäftigten relativ klein ist.

Die Durchsicht der Daten zeigte in unserem Fall, daß im Rahmen der zulässigen Alternativen nur etwa 5% der Beschäftigten von einem Werk ins andere verlegt werden können. Damit hat der Steuergesichtspunkt eine relativ geringe Bedeutung, und er wird im Modell nicht berücksichtigt.

4325 Sortenwechselkosten

Um den Einfluß der Sortenwechselkosten auf die Bewertung der Alternativen abzuschätzen, ist es notwendig, sich einen Überblick zu verschaffen über:

1. die Änderung der Zahl der Sortenwechsel als Funktion der Produktionsprogramme der Werke und
2. die anfallenden Kosten pro Sortenwechsel.

Zu 1.: Die Mengen, der in beiden Werken gefertigten Rohrarten, beeinflussen die Zahl der Sortenwechsel nur indirekt über die Regeln der monatlichen Produktions- und Lagerplanung. Diese Regeln, die im folgenden beschrieben werden, sollen als gegeben angenommen werden.

Am Ende eines Kalenderjahres werden für das nächste Kalenderjahr sogenannte Soll-Grundzahlen festgelegt. Die Soll-Grundzahlen für den Absatz jeder einzelnen Rohrart sind erwartete, durch subjektive Schätzung aufgrund der Vorjahreszahlen gewonnene, jahresdurchschnittliche Verkaufsmengen pro Monat. Die Soll-Grundzahlen für die Lagermengen sind das $\frac{1}{2}$- bis 2-fache der Soll-Grundzahlen für den Absatz. Die unterschiedlichen Vielfache werden ebenfalls durch subjektive Schätzung festgelegt und sollen möglichst wirtschaftliche Losgrößen ermöglichen.

Die Soll-Grundzahlen werden monatlich durch einen Faktor berichtigt. Die Absatz-Grundzahlen durch den Verkaufsfaktor, der den Saisonverlauf des Vorjahres wiedergibt, die Lagergrundzahlen durch den Lagerfaktor, der eine gleichmäßigere Monatsproduktion durch Lageraufbau im Saisontief und -abbau im Saisonhoch unterstützen soll. Die entstehenden Zahlen sind die monatlichen Soll-Verkaufs- bzw. Soll-Lagerzahlen.

Die Produktionsplanung erfolgt monatlich am Ende eines Monats für den folgenden Monat. Die Grundregel ist, daß die Produktion einer Rohrart eingeplant wird, wenn sich zum Planungszeitpunkt ergibt, daß bei Soll-Verkauf im nächsten Monat der halbe Soll-Lagerbestand unterschritten wird. Eingeplant wird die Fehlmenge zwischen Soll-Lagerbestand und voraussichtlichem Ist-Lagerbestand bei Soll-Verkauf am Ende des Planungsmonats.

Diese Grundregel wird jedoch flexibel gehandhabt: ein Teil der beim Sortenwechsel anfallenden Kosten fällt bei jeder Produktionsunterbrechung an. Da in der Regel die Produktion an jedem Wochenende unterbrochen wird, werden kleine Abweichungen von der Grundregel hingenommen, um Sortenwechsel auf Wochenende fallen zu lassen.

Die Annahme, daß die bisherige Produktions- und Lagerpolitik beibehalten wird, wirkt sich bei der Aufteilung der Produktion einer Rohrart auf beide Werke so aus, daß die Absatz- und Lager-Soll-Zahlen im Verhältnis der Aufteilung der Produktionsmengen auf die beiden Werke aufgeteilt werden. Die Gesamt-Lager-Sollmenge bleibt gleich groß, die Lose werden gegenüber der Produktion der Rohrart in nur einem Werk kleiner geplant. Ob und wieviel in einem Monat von einer Rohrart in einem Werk produziert wird, ergibt sich aus den zufälligen, monatlichen Absatzschwankungen. Zwar läßt sich schließen, daß die Zahl der Sortenwechsel, wenn ein Produkt in beiden Werken gefertigt wird, größer ist als bei Produktion in nur einem Werk, in welchem Maße die Zahl der Sortenwechsel aber steigt, ergibt sich erst über die Kapazitäten der verwendeten Rohrstraßen.

Die stichprobenhafte Auswertung der Daten, insbesondere der Mindest- und Maximallagermengen, aufgrund der obigen Überlegungen ergab, daß keine der Rohrweiten innerhalb der monatlichen Produktionsplanung mehr als einmal auf einer Rohrstraße neu eingeplant werden muß:

- entweder ist der auf das einzelne Werk zukommende Bedarf einer Rohrart kleiner als eine Monatsproduktion des verwendeten Rohrstraßentyps, dann ist die Differenz zwischen Mindest- und Maximallagerbestand mindestens gleich einer Monatsabsatzmenge festgelegt, und das Lager wird nur einmal durch den Einsatz einer Rohrstraße aufgefüllt.
- Oder der auf das einzelne Werk zukommende Bedarf ist größer als eine Monatsproduktion des verwendeten Rohrstraßentyps. Dann produzieren eine oder mehrere Rohr-

straßen fortlaufend ohne Sortenwechsel. Die Anpassung an die festgelegten Mindest- und Höchstlagermengen erfolgt mit der letzten Rohrstraße, deren Kapazität im Regelfall nicht voll genutzt wird. Diese letzte Rohrstraße wird aber monatlich höchstens einmal für eine bestimmte Rohrweite eingesetzt.

Zu 2.: Die anfallenden Kosten pro Sortenwechsel

Beim Sortenwechsel wird zunächst ein Mittel in den Extruder eingefahren, das das Festwerden des Materials im Extruder während der Umbauzeit verhindert. Danach wird der Extruder abgestellt, und der Düsensatz und gegebenenfalls auch der Rohrkopf, wenn der folgende Düsensatz einen anderen Rohrkopf verlangt, ausgewechselt. Darauf wird das das Festwerden verhindernde Mittel aus dem Extruder gefahren und die Produktion der neuen Rohrart aufgenommen. Je nach Rohrweite, Wandstärke und Qualitätsanforderungen fällt ein unterschiedlich großer Teil der Anfangsproduktion als Ausschuß an. Das Material kann aber zum größten Teil zurückgewonnen und zum zweiten Mal verwendet werden (sogenanntes Umlaufmaterial).

Das Ein- und Ausfahren des das Festwerden des Materials im Extruder verhindernden Mittels sowie die Ausschußproduktion beim Anlaufen der neuen Rohrart verursachen Kosten, die bei jeder Produktionsunterbrechung, also insbesondere an allen Wochenenden, anfallen. Beim Sortenwechsel am Wochenende entstehen als dem einzelnen Sortenwechsel zurechenbare Kosten nur die Arbeitskosten des Umbaus.

Beim Sortenwechsel während der Woche müssen dem einzelnen Sortenwechsel direkt zugerechnet werden:

- Schrottkosten, das sind die Materialkosten des nicht mehr zurückgewinnbaren Materials der Ausschußproduktion, und
- Umlaufmaterialkosten, das sind die Kosten der Rückgewinnung von Material aus der Ausschußproduktion.

Zudem tritt beim Sortenwechsel während der Woche ein Kapazitätsverlust ein, der dazu zwingen kann, eine zusätzliche Rohrstraße mit dazugehörigen Werkzeugen und Arbeitskräften einzusetzen.

Bereits der Vergleich, der den einzelnen Sortenwechseln direkt zurechenbaren Kosten zeigt, daß die Bedeutung des Sachverhalts dann gering ist, wenn Sortenwechsel in der Hauptsache an Wochenenden durchgeführt werden. Welcher Teil der Sortenwechsel auf das Wochenende gelegt werden kann, ist abhängig von

1. den Mengen, die von den einzelnen Rohrweiten in einem Werk gefertigt werden,
2. der Kapazität der verwendeten Rohrstraßen,
3. der Abweichung von den Regeln der Produktionsplanung, die in Kauf genommen wird, um Sortenwechsel auf Wochenende zu legen.

Die Analyse der Nachfragedaten bezogen auf die Rohrstraßenkapazitäten ergab, daß die Zahl der Sortenwechsel, die nicht auf Wochenende zu legen sind, klein bleibt, solange Produktionsverteilungen realisiert werden, bei denen der Mengenanteil eines Werks an der Gesamtnachfrage der Rohre der einzelnen Rohrweite nicht sehr klein ist. Auch diese extremen Verteilungen sind zwar im Entscheidungsspielraum grundsätzlich enthalten, sie liegen aber in einem Bereich, in dem das Optimum aus anderen Kostengründen (z.B. den Kapazitätskosten) auf keinen Fall liegen wird. Für die interessierenden Produktionsverteilungen sind Sortenwechsel an Wochenenden die Regel. Die Kosten, die als Folge der seltenen Sortenwechsel während der laufenden Produktionswoche entstehen, haben so geringe Bedeutung, daß sie in jedem Fall vernachlässigt werden dürfen.

Geht man von den Kosten der Sortenwechsel an Wochenenden aus und rechnet man mit der im Extremfall auftretenden Zahl von monatlich einem Sortenwechsel pro Rohrweite und

Werk, so ergibt sich, daß der Einfluß der Sortenwechselkosten auf die Bewertung der Alternativen relativ gering ist. Sortenwechselkosten werden daher im Modell nicht berücksichtigt.

4326 Kosten sonstiger Produktionsfaktoren

Materialkosten haben wir bereits im Abschnitt 4321 als nicht entscheidungsabhängig bezeichnet. Die Oberprüfung der übrigen Produktionsfaktoren ergab Entscheidungsabhängigkeit bei:

1. den Lohn- und Gehaltskosten

   Das Lohn- und Gehaltskostenniveau weist, da Werk 2 in einem hochentwickelten Industriegebiet liegt, Werk 1 aber in einem wirtschaftlich unterentwickelten Gebiet, große Unterschiede auf. Insoweit als das Entscheidungsfeld eine Änderung der Zahl der Arbeitskräfte zuläßt, können sich diese Lohn- und Gehaltsunterschiede auf die Bewertung der Alternativen auswirken.
   Bei einer sehr langfristigen Betrachtung bekämen diese Kostenunterschiede eine entscheidende Bedeutung, weil

   a) Löhne und Gehälter abgebaut werden könnten, die in unserer Betrachtung weitgehend fix sind und

   b) die absolute Differenz zwischen den Lohn- und Gehaltskosten an verschiedenen Standorten mit steigender Lohn- und Gehaltshöhe zunimmt, d.h. daß gerade die weitgehend fixen Gehaltskosten der besser bezahlten Angestellten die größten, standortbedingten Kostendifferenzen aufweisen.

   In unserem Fall kann sich als Folge der kurzfristigen Betrachtungsweise nur die Zahl der an den Rohrstraßen und mit nachfolgenden Arbeitsgängen beschäftigten Lohnempfänger ändern. Immerhin verursacht die maximale Änderung der Zahl der in beiden Werken beschäftigten, angelernten Arbeiter einen maximalen Lohnkostenunterschied, der so groß ist, daß auf die Erfassung

des Sachverhalts im Modell nicht verzichtet werden sollte.

2. Energiekosten

Zwischen beiden Werken bestehen Preisunterschiede, für elektrische Energie, einer Energieform, die in relativ großen Mengen zum Betrieb der Rohrstraßen benötigt wird. Im Werk 2 steht billiger Werkstrom zur Verfügung, während im Werk 1 die öffentliche Stromversorgung in Anspruch genommen werden muß. Die Analyse der Daten bestätigt jedoch eine in Fertigungsunternehmen häufig gemachte Feststellung, daß der Anteil der Energiekosten an den Fertigungskosten so gering ist, daß es nicht notwendig ist, diesen Sachverhalt in einem Modell zu berücksichtigen.

44 Das Entscheidungsmodell

Erst nachdem Klarheit darüber besteht, welche Sachverhalte im Modell verarbeitet werden sollen, kann der Modellaufbau mit der Definition passender Entscheidungsvariabler fortgesetzt werden. In das Modell sollen die folgenden Kostenarten eingehen:

1. Transportkosten der Fertigprodukte vom liefernden Werk zum Absatzbezirk,
2. Werk-zu-Werk-Transport,
3. aus der Ganzzahligkeit resultierende Doppelausstattungskosten,
4. Lohnkosten der "Arbeitstypen", für die die Arbeitsplatzzahl in den Werken variabel ist.

441 Die Definition der Entscheidungsvariablen

Wir unterscheiden zunächst drei Klassen von Entscheidungsvariablen:

1. Variable zur Kennzeichnung des Transports vom liefernden Werk zum Kunden,

2. Variable zur Kennzeichnung des Werk-zu-Werk-Transports,

3. Variable zur Kennzeichnung der Werksproduktion.

Als Dimension dieser Entscheidungsvariablen können entweder Längen- oder Gewichtseinheiten gewählt werden. Da die Zahl der Umrechnungen bei Messung in Gewichtseinheiten kleiner ist, wird diese gewählt. Alle Mengenangaben beziehen sich also auf Rohrgewichte.

Die Gesichtspunkte, nach denen die Entscheidungsvariablen unterschieden werden und die Feinheit der Unterscheidung hängen von den im Modell zu verarbeitenden Sachverhalten und deren relativer Bedeutung für die Bewertung der Alternativen ab. Zusammenfassungen von Rohrarten beeinträchtigen den Wert des Modells nur dann nicht, wenn

1. die im Modell berücksichtigten Kosten pro Mengeneinheit einer entsprechend definierten Rohrart für jede Mengeneinheit, die gefertigt, bzw. transportiert wird, gleich hoch sind, und

2. jede Mengeneinheit den gleichen Bruchteil der Kapazität möglicher Engpaßeinheiten verbraucht.

Es besteht wiederum das bereits bei der Auswahl der im Modell zu erfassenden Sachverhalte gegebene Problem, daß die Berücksichtigung aller im Hinblick auf die obigen Gesichtspunkte möglichen Unterscheidungen zu einem Modellumfang führt, der von der Datenbeschaffung und dem Rechenaufwand her nicht gerechtfertigt ist. Der sinnvolle Vergröberungsgrad muß "intuitiv" gewählt werden.

4411 Kennzeichnung der Werksproduktion

Unterschiede in den Produktionskosten pro Mengeneinheit ergeben sich für verschiedene Rohrtypen und -weiten insbesondere

- wegen der unterschiedlich hohen Kosten von Spezialwerkzeugen, die entscheidungsabhängige Leerkapazitätskosten verursachen, und
- als Folge des Einsatzes von Extrudertypen mit unterschiedlicher Leistung zur Produktion der gleichen Rohrtype und -weite bei den Lohnkosten.

Hinzu kommt, daß die Leistung der Extruder aufgrund der beschränkten Fertigungshallenflächen und der damit beschränkten Zahl von Rohrstraßen, die in einem Werk aufgestellt werden können, die Werkskapazitäten beeinflußt.

Wir benötigen somit eine Kennzeichnung der Werksproduktion im Hinblick auf den Rohrtyp, die Rohrweite und den zur Produktion verwendeten Extrudertyp. Bei 5 Rohrtypen, die jeweils in 6 bis 9 verschiedenen Rohrweiten hergestellt werden, und 6 verschiedenen Extrudertypen muß die Zahl der möglichen Rohrarten durch Zusammenfassungen verkleinert werden. Solche Zusammenfassungen beinhalten die, von der Produktionstechnik her gesehen, willkürliche Annahme, daß bestimmte Rohrweiten einer Rohrtype grundsätzlich zusammen im gleichen Werk gefertigt werden. Damit wird ein Teil der Alternativen nicht berücksichtigt. Diese Alternativen sind aber Alternativen, die "zwischen" erfaßten Alternativen liegen, z.B. können aufgrund der im folgenden gewählten Zusammenfassungen für den Rohrtyp "Abflußrohr", der in 6 verschiedenen Rohrweiten gefertigt wird, Alternativen untersucht werden, bei denen in einem bestimmten Werk gefertigt wird:

- nichts,
- die drei kleineren Rohrweiten bzw.
- die drei größeren Rohrweiten oder
- alle Rohrweiten des Abflußrohrs.

Eine Alternative, bei der z.B. nur die beiden kleinsten Rohrweiten in einem bestimmten Werk gefertigt werden sollen, kann nicht untersucht werden. Es besteht die Möglichkeit, daß das tatsächliche Kostenminimum auf eine Al-

ternative fällt, die gerade nicht im Modell enthalten ist. Die Frage ist, ob dadurch der Wert des Modells beträchtlich sinkt.

Die kritische Durchsicht aller Kostenarten, die im Modell enthalten sind, zeigt, daß keine der Kostenarten speziell darauf hinwirkt, daß sich ein deutliches Kostenminimum gerade für eine nicht erfaßte Alternative ergeben könnte. Deshalb werden für den Fall, daß das Kostenminimum auf eine nicht erfaßte Alternative fällt, die daneben liegenden, erfaßten Alternativen ebenfalls gute Ergebnisse liefern. Der Wert des Modells wird durch die vorgenommenen Zusammenfassungen mehrerer Rohrweiten zu einer Rohrart nur geringfügig herabgesetzt.

Die Zusammenfassung mehrerer Rohrweiten zu einer Rohrart macht eine Annahme darüber notwendig, zu welchen Anteilen die verschiedenen Rohrweiten an einer Mengeneinheit einer Rohrart beteiligt sind. Der Grund dafür ist, daß z.B. Düsensätze nur zur Produktion einer bestimmten Rohrweite eingesetzt werden können. Wenn daher eine bestimmte Menge einer Rohrart gefertigt wird, muß eindeutig feststehen, welche Teile dieser Menge auf die einzelnen Rohrweiten entfallen; denn nur dann läßt sich ermitteln, welcher Teil der Kapazität eines Düsensatzes durch die Produktion der Rohrart verbraucht wird. Es wird angenommen, daß die Anteile, mit denen verschiedene Rohrweiten an einer Mengeneinheit einer Rohrart beteiligt sind, gleich den Mengenverhältnissen sind, in denen die beteiligten Rohrweiten im Entscheidungszeitraum nachgefragt werden. Angenommen, die Nachfragemengen nach drei zu einer Rohrart zusammengefaßten Rohrweiten seien:

Weite 1 :	20 Mengeneinheiten
Weite 2 :	30 Mengeneinheiten
Weite 3 :	50 Mengeneinheiten
Weite 1,2,3 zusammen:	100 Mengeneinheiten

diesem Fall bedeutet die Angabe, daß von dieser Rohr-
t 10 Mengeneinheiten in einem bestimmten Werk gefertigt
rden sollen, daß 2 Mengeneinheiten der Weite 1, 3 der
ite 2 und 5 der Weite 3 gefertigt werden sollen.

fgrund der Unterscheidung nach Rohrtypen und -weiten
rden 8 Rohrarten definiert. Jede dieser Rohrarten muß
Hinblick auf 1 bis 3 Extrudertypen, die zu ihrer Pro-
ktion in Frage kommen, weiter spezifiziert werden. Wir
halten 15 von der Produktion her definierte Rohrarten,
e wir mit dem Index i kennzeichnen. Bezeichnet man
s produzierende Werk mit j = 1,2 so lassen sich die
rksproduktionen mit 30 "Produktionsvariablen"

$$X_{ij} \quad \text{wobei} \quad i=1,\ldots,15, \quad j=1,2$$

fassen, die angeben, welche Menge (in Gewichtseinhei-
n/Jahr) der Rohrart i im Werk j gefertigt wird.

12 Kennzeichnung des Werk-zu-Werk-Transports

f den Werk-zu-Werk-Transport trifft die Annahme nur
ngenabhängiger Transportkostenkoeffizienten des her-
mmlichen Transportmodells zu. Man wird hier je nach
ansportmittel möglichst günstige Mengen, z.B. ganze
W-Ladungen, bzw. bei Eisenbahnversand Waggonladungen
m günstigsten Abrechnungstarif transportieren. Hinzu
mmt, daß die Unterscheidung der Produktion nach der
rwendeten Rohrstraße nicht notwendig ist, um die Ko-
en des Werk-zu-Werk-Transport und die durch ihn ver-
sachte Veränderung der Werkslieferprogramme festzu-
lten.

r definieren die Variablen Y^2_{rs} (mit der Dimension:
wichtseinheiten/Jahr), wobei entsprechend der im Ab-
hnitt 4411 getroffenen Gliederung nach Rohrtypen und
eiten der Index r die Rohrart bezeichnet und von 1
s 8 läuft. s bezeichnet das liefernde Werk: s=1,2 .

4413 Kennzeichnung des Werk-zu-Kunden-Transports

Die Kosten pro transportierter Mengeneinheit hängen ab:

1. Von der Entfernung der Werke zu den Absatzbezirken

   Insbesondere ist zu entscheiden wie detailliert die Gliederung nach Absatzpunkten zu wählen ist. Eine sehr detaillierte Aufteilung des Gebietes in Absatzbezirke ist, wenn man von den Schwierigkeiten der Datenbeschaffung absieht, nur sinnvoll, wenn die sonstigen die Transportkosten beeinflussenden Tatbestände, wie das Sendungsgewicht (vgl. Abschnitt 221), in entsprechendem Detail erfaßt werden. Wenn, wie in unserem Fall, die Transportkosten verursachenden Bestellmengen zwischen 100 kg und 10 to schwanken und sich der Frachtpreis pro Mengeneinheit bei gleicher Lieferentfernung für die große Menge auf ½ des Preises der kleinen Menge ermäßigt, ist es nicht angebracht eine Vielzahl von Absatzpunkten zu unterscheiden, im Übrigen aber von einem homogenen Absatzprodukt auszugehen.

   Das Gebiet der BRD ist in 16 Vertreterbezirke aufgeteilt. Es ist zweckmäßig, diese Gliederung zu nutzen, da sich die Absatzzahlen der Vergangenheit für diese Gebiete aus den Firmenaufzeichnungen ermitteln lassen. Eine zusätzliche Vereinfachung erhalten wir dadurch, daß Vertreterbezirke in unmittelbarer Nähe einzelner Werke und Vertreterbezirke, die – von der Gebietsgröße und den Absatzmengen her gesehen – relativ klein sind, zusammengefaßt werden. Im Modell werden 9 Absatzbezirke unterschieden, die mit den Indices $k = 1,\ldots,9$ bezeichnet werden.

2. Vom Gewicht und der Zusammensetzung der Lieferung

   Die maximalen Liefergewichte sind identisch mit den Gewichten der Bestellungen. Daneben beeinflußt die Zusammensetzung der Bestellung die Transportkosten pro Gewichtseinheit, weil für einige besonders dünn-

wandige Rohrtypen die Transportkosten neben dem Gewicht auch vom beanspruchten Transportraum abhängen. Z.B. werden beim Bahntransport Zuschläge wegen "Sperrigkeit" berechnet.

Die Zahl der Auftragszusammensetzungen von Aufträgen über mehrere Rohrarten, die explizit berücksichtigt werden kann, ist bereits durch die gewählte Einteilung der Produktion nach Rohrtyp und -weite in 8 Rohrarten eingeschränkt. Dieser grobe Raster führt zunächst dazu, daß Aufträge, die über mehr als zwei Rohrarten gehen, selten vorkommen und daher unberücksichtigt bleiben dürfen. Trotzdem ist aber die Zahl der Auftragszusammensetzungen, die unterschieden werden könnte, groß, weil beliebig viele Aufteilungen des Auftragsgewichts auf jeweils zwei Rohrarten unterschieden werden könnten. Wir gehen bei der Definition von Auftragstypen wie bei der Definition der Rohrarten vor und machen die Annahme, daß die Gewichtsanteile, mit denen verschiedene Rohrarten an einer Mengeneinheit einer Auftragstype beteiligt sind, gleich den Mengenverhältnissen sind, in denen die beteiligten Rohrarten in der Planungsperiode nachgefragt werden. Die gewählten Gliederungsgesichtspunkte sind:

a) Bei Bestellungen mit geringem Auftragswert trägt der Kunde die Versandkosten. Trotzdem müssen die entsprechenden Mengen getrennt nach Rohrtyp und -weite erfaßt werden, damit die entsprechenden Produktionskosten und der Kapazitätsverbrauch festgehalten werden können. Entsprechend der 8 von der Produktion her definierten Rohrarten geben wir diesem Versand die Indices $l = 1,\ldots,8$.

b) Beim kostenverursachenden Versand kommt zunächst Lieferung der 8 Rohrarten getrennt in Frage. Außerdem werden die Rohrarten 1 und 2 , 3 und 4 , 4 und 5 häufig in einem Auftrag gemeinsam bestellt, so daß für diese 3 Auftragszusammensetzungen gemeinsame Lieferung und damit ein günstigeres Liefergewicht realisiert werden kann.

c) Diese unter b) genannten 8 + 3 = 11 "Liefertypen" werden weiter nach Sendungsgewichten gegliedert. Entscheidend für die Zahl der Gewichtsbereiche, die für die einzelne Liefertype zu bilden ist, sind:

- der Variationsbereich der Bestellgewichte (ein breiter Gewichtsbereich spricht für eine größere Zahl von Gewichtsklassen) und
- die insgesamt im Entscheidungszeitraum zu transportierenden Mengen (je größer die Menge, um so größer der Einfluß des Gewichtsbereichs auf die Bewertung der Alternativen).

Entsprechend werden für jede Liefertype 2 bis 5 Gewichtsbereiche unterschieden, die für die einzelnen Liefertypen unterschiedlich, entsprechend der aus den Daten ermittelten Gewichtsverteilungen, festgelegt werden (vgl. Abschnitt 51).

Die Gliederung aufgrund der Punkte b) und c) beansprucht die Indexplätze $l = 9,\ldots,47$.

Wir definieren die Variablen Y^l_{ijk} , wobei der Index l das Lieferprodukt ($l = 1,\ldots,47$) , der Index j das liefernde Werk ($j = 1,2$) und der Index k den Absatzbezirk ($k = 1,\ldots,9$) bezeichnet (Dimension: Gewichtseinheiten/Jahr).

442 Strukturierung der Umwelt

4421 Die Nachfrage

Die gewählte Gliederung der Entscheidungsvariablen ist nur sinnvoll, wenn die Nachfrage entsprechend strukturiert wird. D.h. für jeden der 9 Absatzpunkte muß die nachgefragte Menge in 47 Untermengen gegliedert werden. A^l_{mk} bezeichne die Nachfragemengen im Entscheidungszeitraum (in Gewichtseinheiten/Jahr), wobei m verschiedene Rohrarten und Bestellgewichte dieser Rohrarten für

die Absatzbezirke k ($k = 1,\ldots,9$) kennzeichnet. Die Indices $m = 1,\ldots,8$ kennzeichnen Nachfragekategorien der 8 unterschiedenen Rohrarten, bei denen Lieferkosten wegen geringer Auftragswerte vom Kunden zu tragen sind. Die Lieferungen von beiden Werken müssen mindestens gleich den in diesen Kategorien nachgefragten Mengen sein[1]:

$$\sum_{j} Y^{1}_{mjk} \geq A^{1}_{mk}$$

$$m=1,\ldots,8;\ k=1,\ldots,9 \qquad (4.1)$$

Die Indices $m = 9,\ldots,36$ bezeichnen Nachfragekategorien, die Lieferkosten verursachen. Dimensionslose Koeffizienten D^{1}_{lm} geben an, welcher Anteil einer Liefermenge Y^{1}_{ljk} einen Beitrag zur Befriedigung der Nachfrage A^{1}_{mk} leistet. Diese Koeffizienten sind nur dann $D^{1}_{lm} \neq 0$, wenn die Lieferklasse l der Nachfrageklasse m entspricht:

- wird nur eine Rohrart in einer Sendung des Typs l geliefert, so ist $D^{1}_{lm} = 1$
- werden mehrere Rohrarten zusammen geliefert, so gilt: $0 < D^{1}_{lm} < 1$,

Die Restriktionen lauten:

$$\sum_{lj} D^{1}_{lm}\, Y^{1}_{ljk} \geq A^{1}_{mk} \qquad (4.2)$$

$$m=9,\ldots,36;\ k=1,\ldots,9$$

Zudem muß sichergestellt werden, daß Lieferungen von mehreren Rohrarten zusammen nur im Rahmen der jährlichen Gesamtmengen der Aufträge über mehr als eine Rohrart durch-

---

[1] Zur Formulierung der folgenden Restriktionen vgl. Abschnitt 221

geführt werden (vgl. Abschnitt 221: Die Lieferung zusammen bestellter Rohrarten in einer Sendung ist wegen des höheren Sendungsgewichts billiger als Getrenntlieferung der Rohrarten.) Aufgrund der gewählten Gliederung der Nachfrage in 8 Rohrarten laufen die vorkommenden Aufträge dabei über nicht mehr als zwei Rohrarten.

A^a_{nk} bezeichnet die Mengen (in Mengeneinheiten/Jahr), die im Rahmen solcher Aufträge über 2 Rohrarten maximal in einer Sendung geliefert werden können, wobei $n = 1,\ldots,11$ und $k = 1,\ldots,9$.

D^a_{in} seien dimensionslose Koeffizienten, die den Anteil der Lieferkategorie n an der Liefermenge $Y^1_{i..}$ angeben.
Die Werte, die diese Koeffizienten annehmen, ergeben sich aus der gewählten, vereinfachten Struktur der Nachfrage, die aus den Daten zu ermitteln ist (vgl. Abschnitt 51).

$$\sum_{ji} D^a_{in} \cdot Y^1_{ijk} \leq A^a_{nk} \qquad (4.3)$$

für $n=1,\ldots,11$; $k=1,\ldots,9$

4422 Die Lieferkapazitäten der Werke

Die Lieferkapazität eines Werkes setzt sich zusammen aus

1. Mengen, die im Werk gefertigt werden und nicht in ein anderes Werk zur Vervollständigung dessen Liefersortiments transportiert werden, und
2. Mengen, die zuvor von einem anderen Werk zum liefernden Werk transportiert wurden.

Die Verbindung zwischen den Lieferprodukten l des Werk-zu-Kunden-Transports bzw. den Produkten des Werk-zu-Werk-Transports r und den von der Produktion her definierten Produkten i wird durch zwei dimensionslose Koeffizientengruppen erreicht, deren Werte sich aus der

gewählten, vereinfachten Struktur von Produktion und Absatz ergeben:

D^3_{li} sei der Anteil der Produktionskategorie i an der Liefermenge $Y^1_{l..}$, wobei l=1,...,47; i=1,...,15

D^4_{ri} sei der Anteil der Produktionskategorie i an der Liefermenge $Y^1_{r.}$, wobei r=1,...,8; i=1,...,15 .

Wir erhalten die Restriktionen:

$$\sum_{kl} D^3_{li} \cdot Y^1_{ljk} \leq X_{ij} + \sum_{r} D^4_{ri} \left(\sum_{s \neq j} Y^2_{rs} - Y^2_{rj} \right) \qquad (4.4)$$

für i=1,...,15; j=1,2 .

Zusätzlich wird die Lieferkapazität des einzelnen Werkes durch die vorhandene Lagerkapazität beschränkt. Die in anderem Zusammenhang (Abschnitt 4325) geschilderte Produktions- und Lagerpolitik führt nur dann zu einer entsprechenden Lieferbereitschaft, wenn im liefernden Werk ein bestimmter Teil der Jahreslieferung des jeweiligen Werkes gelagert werden kann.
Bezeichnet man mit

E^1_l den Lagerflächenbedarf (in Flächeneinheiten pro Gewichtseinheit) der Variablen $Y^1_{l..}$ und mit

B^1_j die Lagerfläche des Werks j (in Flächeneinheiten)

so lassen sich die Restriktionen schreiben

$$\sum_{lk} Y^1_{ljk} \cdot E^1_l \leq B^1_j \qquad (4.5)$$

für j=1,2

4423 Die Produktionskapazitäten der Werke

Im Abschnitt 4325 wurde bereits darauf hingewiesen, daß durch entsprechende Lagerpolitik versucht wird, trotz der saisonalen Absatzschwankungen, eine möglichst gleichmäßige Produktion während des ganzen Jahres zu erreichen. Die Maßnahmen der Absatzpolitik genügen jedoch nicht, um die Produktion vollkommen gleichmäßig zu gestalten. Um

die notwendigen Beschäftigungsschwankungen möglich zu machen, müssen die Kapazitäten der Extruder und Mischer entsprechend höher als die durchschnittliche Monatsproduktion des Jahres sein. Das Unternehmen plant die insgesamt notwendigen Kapazitäten daher bereits so hoch, daß diese Schwankungen möglich werden. Im Modell wird der Umstand, daß die Kapazität eines Werkes ausreichen muß, um in einigen Monaten mehr als die jahresdurchschnittliche Monatsproduktion zu fertigen, durch entsprechende Kürzung der in den einzelnen Werken zur Verfügung stehenden Kapazitäten berücksichtigt.

Die die Produktion einschränkenden Engpaßfaktoren sind:

1. die Mischerkapazität

   Die Kapazität der in den einzelnen Werken zur Verfügung stehenden Mischer zur Aufbereitung des Rohmaterials ist begrenzt. Zwar wäre es möglich, technische Koeffizienten für jede einzelne Rohrart anzugeben, da der Schrottanfall bei den einzelnen Rohrarten Unterschiede aufweist und die Mischerkapazität pro Mengeneinheit einer Rohrart daher unterschiedlich beansprucht wird, aus dem Datenmaterial ergibt sich jedoch, daß die Unterschiede so gering sind, daß der gleiche Koeffizient für alle Rohrarten berücksichtigt werden kann. Die technisch mögliche Mischerkapazität des jeweiligen Werkes wird entsprechend gekürzt.

   Bezeichnet man die berichtigte Mischerkapazität, gemessen in Rohrgewichtseinheiten pro Jahr, eines Werkes mit B_j^a, dann lauten die Nebenbedingungen:

$$\sum_i X_{ij} \leq B_j^a \quad \text{für } j=1,2 \qquad (4.6)$$

   d.h. die in einem Werk produzierten Jahresmengen der einzelnen Rohrarten dürfen nicht größer sein als es die Mischerkapazitäten erlauben.

2. die Rohrstraßenkapazitäten

Die Rohrmenge, die pro Jahr in einem Werk gefertigt werden kann, hängt darüberhinaus davon ab, wieviele Rohrstraßen aufgestellt werden können und welche Kapazitäten die aufgestellten Rohrstraßentypen haben. Dem Umstand, daß die Zahl der im Unternehmen vorhandenen Rohrstraßen mit hoher Ausstoßleistung begrenzt ist, muß durch einen Satz Nebenbedingungen Rechnung getragen werden.
Wir bezeichnen mit

R_e die im Unternehmen vorhandene Rohrstraßenkapazität eines Typs e (in Rohrgewichtseinheiten/Jahr) mit bestimmter Ausstoßgeschwindigkeit und bestimmtem Platzbedarf, wobei $e = 1,\ldots,6$

K_{ei} einen dimensionslosen, technischen Eignungskoeffizienten, der den Wert 1 annimmt, wenn die Rohrart i auf einer Rohrstraße des Typs gefertigt werden kann und den Wert 0 annimmt, wenn nicht. (wobei $e = 1,\ldots,6$, $i = 1,\ldots,15$).

Dann gilt

$$\sum_{ij} K_{ei} \cdot X_{ij} \leq R_e \quad \text{für } e=1,\ldots,6 \qquad (4.7)$$

3. die Fertigungshallengröße

Die Zahl der Rohrstraßen, die in den vorhandenen Hallen aufgestellt werden können, ist begrenzt. Der Einfachheit halber wird der Ganzzahligkeitsgesichtspunkt vernachlässigt. Wir bezeichnen mit

E_e^2 Koeffizienten, die den Platzbedarf (in Flächeneinheiten/produzierte Mengeneinheit) bei Einsatz einer Rohrstraße vom Typ e angeben,

B_j^3 die vorhandene Fertigungshallenfläche in Werk j (in Flächeneinheiten)

und erhalten die Nebenbedingungen:

$$\sum_{j} E_e^2 K_{ei} X_{ij} \leq B_j^3 \quad \text{für } j=1,2 \qquad (4.8)$$

443 Strukturierung der Zielfunktion und zugehöriger Nebenbedingungen

4431 Werk-zu-Kunden-Transport

Dadurch, daß bei der Definition der Liefervariablen Y^1_{ijk} der Einfluß der Sendungsgewichte bei der Klassenbildung berücksichtigt wurde, ist es möglich, den einzelnen Lieferklassen konstante Transportkoeffizienten C^1_{ijk} zuzuordnen, die die Kosten angeben, die durch den Transport einer Mengeneinheit des Liefergutes i von Werk j zum Absatzpunkt k anfallen (in Geldeinheiten/Rohrgewichtseinheit). Da $i = 1,\ldots,47$, $j=1,2$, $k=1,\ldots,9$ erhalten wir 846 Koeffizienten. Für $i = 1,\ldots,8$ tragen die Kunden die Kosten des Transports; die Koeffizienten sind $C^1_{ijk} = 0$.

Die Gesamttransportkosten (in Geldeinheiten/Jahr) werden durch den folgenden Zielfunktionsterm erfaßt:

$$\sum_{ijk} Y^1_{ijk} \cdot C^1_{ijk} \qquad (4.9)$$

4432 Werk-zu-Werk-Transport

Der Gesichtspunkt unterschiedlich hoher Auftragsgewichte und unterschiedlicher Auftragszusammensetzung hat für den Wer-zu-Werk-Transport keine Bedeutung. Lediglich als Folge unterschiedlicher Sperrigkeiten ergeben sich für die 8 Rohrarten, die im Werk-zu-Werk-Transport unterschieden werden sollen (vgl. Abschnitt 4412) unterschiedlich hohe Transportkosten pro Mengeneinheit. Die Transportrichtung wird nicht berücksichtigt. Die Koeffizienten sind: C^a_r , $r = 1,\ldots,8$ und geben die Kosten des Transports einer Mengeneinheit des Produktes r zwischen beiden Werken an (in Geldeinheiten/Rohrgewichtseinheit). Die Gesamtkosten (in Geldeinheiten/Jahr) ergeben den Zielfunktionsterm:

$$\sum_{rs} Y^a_{rs} \cdot C^a_r \qquad (4.10)$$

4433 Kosten der im Rahmen der Entscheidung variablen Kapazitäten

Bedeutenden Einfluß auf die Bewertung der Alternativen haben die Kosten teuerer Spezialmaschinen, die bei Konzentration der betreffenden Produktion auf nur ein Werk nur einmal benötigt werden. Werden bei Fertigung in nur einem Werk 4 oder 5 Aggregate benötigt, dann kann bei Produktion in beiden Werken bereits durch relativ geringe Produktionsumverteilung eine Aufteilung der Produktion erreicht werden, die ohne eine zusätzliche Maschine realisiert werden kann. Die Berücksichtigung der Ganzzahligkeit für solche Aggregate ist daher weniger dringend. Zudem muß die erhöhte Lösungsschwierigkeit, die gerade durch die Berücksichtigung ganzzahliger Variabler entsteht, bedacht werden. Sie macht es praktisch notwendig, nur die Maschinen zu berücksichtigen, die in jedem Werk je nach Verteilung der Produktion höchstens einmal benötigt werden. Aufgrund gleicher Verwendungsmöglichkeiten und gleicher quantitativer Kapazität lassen sich die in diese Gruppe fallenden Maschinen zu 9 Produktionsfaktoren zusammenfassen. Wir bezeichnen mit

G^1_{ip} Produktionskoeffizienten, die die Kapazitätsbeanspruchung eines Faktors p durch das Produkt i (in Kapazitätseinheiten/Rohrgesichtseinheit) angeben, wobei $i = 1,\ldots,15$ und $p = 1,\ldots,9$

F_p Kapazität des Faktors p (in Kapazitätseinheiten/Jahr) $p = 1,\ldots,9$

C^3_{jp} Kosten (d.h. insbesondere Abschreibungen und Zinsen) einer Einheit des Faktors vom Typ p (in Geldeinheiten/Faktoreinheit und Jahr) $p = 1,\ldots,9$, $j = 1,2$

Z_{jp} Hilfsvariable mit der Dimension: "Faktoreinheiten", für die verlangt wird

$$Z_{jp} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \sum_i X_{ij} > 0 \\ 0 & \sum_i X_{ij} = 0 \end{cases}$$

Die Kosten der benötigten Faktoren (in Geldeinheiten/ Jahr ergeben den Zielfunktionsterm:

$$\sum_{jp} Z_{jp} \cdot C^3_{jp} \qquad (4.11)$$

wobei sein muß

$$\sum_{i} G^1_{ip} \cdot X_{ij} \leq F_p \cdot Z_{jp} \qquad (4.12)$$

für $j=1,2$, $p=1,\ldots,9$

Die Kapazität der berücksichtigten Faktoren F_p, $p = 1,\ldots,9$ reicht jeweils aus, um die gesamte Produktion durchzuführen. Es ist nicht notwendig, die Variablen z_{jp} von oben her zu begrenzen, da $Z_{jp} > 1$ aus Kostengründen ohnehin vermieden wird.

$$0 \leq Z_{jp} \text{ und ganzzahlig} \qquad (4.13)$$

für $j=1,2$, $p=1,\ldots,9$

4434 Lohnkosten

Nur die Lohnkosten werden erfaßt, die für Arbeitskräfte entstehen, die einen Arbeitstyp verrichten, bei dem die Zahl der benötigten Arbeiter in den einzelnen Werken im Rahmen des Entscheidungsspielraums variabel ist. Diese nach der Art der Verrichtung unterschiedenen "Arbeitstypen" sind:

1. Extruderfahrer
2. Kontrolleure,
3. Vorarbeiter in der Extrusionsabteilung und Betriebsschlosser,
4. Arbeiter der Mufferei,
5. Lagerarbeiter.

Zwar können die Arbeitskräfte nicht stundenweise beschäftigt und bezahlt werden und es ergeben sich daher sprungfixe Kosten, aber auch hier soll die Ungenauigkeit, die durch eine Linearisierung auftritt, in Kauf genommen werden. Dies insbesondere, weil die Einsatzmöglichkeiten der zum Großteil angelernten Arbeiter nicht auf eine ganz bestimmte Tätigkeit fixiert sind (mit Ausnahme der Betriebsschlosser und Vorarbeiter).

Bezeichnet man die Lohnkosten (in Geldeinheiten pro gefertigter Mengeneinheit) der Rohrart i im Werk j mit C^4_{ij} , dann lassen sich die Gesamtlohnkosten (in Geldeinheiten/Jahr) schreiben:

$$\sum_{ij} X_{ij} \cdot C^4_{ij} \qquad (4.14)$$

444 Zusammenfassung der Modellteile

Durch Zusammenfassung der Ausdrücke 9, 10, 11, 14 erhalten wir eine Zielfunktion für die Gesamtkosten GK :

$$GK = \sum_{ljk} Y^1_{ljk} \cdot C^1_{ljk} + \sum_{rs} Y^2_{rs} \cdot C^2_r + \sum_{jp} Z_{jp} \cdot C^3_{jp} + \sum_{ij} X_{ij} \cdot C^4_{ij} \qquad (4.15)$$

die zu minimieren ist, wobei die Restriktionen 1 - 8 , 12, 13 zu berücksichtigen sind. Hinzu kommen Nichtnegativitätsbedingungen

$Y^1_{ljk} \geq 0$ für l=1,111,47; j=1,2; k=1,..,9 (4.16)

$Y^2_{rs} \quad 0$ für r=1,...,8; s=1,2; (4.17)

$X_{ij} \quad 0$ für i=1,...,15; j=1,2 (4.18)

5. DATENBESCHAFFUNG UND -AUFBEREITUNG

51 Der Rohrabsatz

Die voraussichtlichen Jahresabsatzmengen der einzelnen Rohrtypen werden gegen Ende eines Jahres für das folgende Kalenderjahr von der Firmenleitung geschätzt. Diese subjektive Schätzung soll als Grundlage für die festzulegenden Rohrabsatzmengen (A^1_{mk} und A^2_{nk}) genutzt und nicht durch eine objektive Prognosemethode ersetzt werden, die sich nur auf die Absatzmengen der Vergangenheit stützt. Die Absatzmengen werden zu sehr durch besondere Ursachenkomplexe beeinflußt. Solche Ursachenkomplexe sind:

1. Der Bedarf des durch den entsprechenden Verwendungszweck der Rohre gebildeten Marktes

   Der Bedarf an Abflußrohren und Dachrinnen wird wesentlich von der Baukonjunktur beeinflußt. Dadurch, daß auch kleinere Gemeinden in den letzten Jahren eine eigene Wasserversorgung aufbauten, war ein erhöhter Bedarf an Druckrohren gegeben. Diese Entwicklung ist weitgehend abgeschlossen. Durch das Wasserhaushaltsgesetz vom 27.7.1957 wird insbesondere die Abwasserbeseitigung durch gemeindliche Kanalisation vorgeschrieben. Dadurch ist mit einem erhöhten Bedarf an Kanalrohren zu rechnen.

2. Die Marktanteile der Kunststoffrohrindustrie

   Substitutionsprodukte für das Kunststoffrohr sind z.B.: Guß-, Asbestzement- und Stahlbetonrohre. Für die Entwicklung des Marktanteils sind Preis- und Qualitätsunterschiede von Bedeutung. Zum Beispiel sind PVC-Abflußrohre bis jetzt noch nicht zufriedenstellend hitzebeständig. (Moderne Waschmaschinen machen ein Rohr notwendig, das einer Temperaturbelastung bis zu 100° C standhält.)

3. Der Marktanteil des Unternehmens innerhalb der Kunststoffrohrindustrie

Die einzelnen Unternehmen machen sich insbesondere durch ihre Preispolitik starke Konkurrenz. Die Marktinformation der Nachfrage ist dabei regelmäßig so gut, und das akquisitorische Potential der einzelnen Unternehmen so klein, daß bereits geringe Änderungen der Rabattsätze zu Absatzmengenänderungen führen. Ohne Berücksichtigung der Preispolitik der Unternehmung im Prognosezeitraum ist eine Vorhersage der Absatzmengen nicht möglich.

Die Vielzahl wichtiger Einflüsse zeigt, wie wichtig hier eine Schätzung durch Experten ist.

Auf die Prognose der Nachfragemengen als Wahrscheinlichkeitsverteilungen wird, insbesondere wegen der wenigen zur Verfügung stehenden Daten und des zusätzlichen Lösungsaufwandes bei der Auswertung solcher Verteilungen, verzichtet.

Die für die einzelnen Rohrtypen prognostizierten Jahresabsatzmengen werden, mit Hilfe der Methode der gleitenden Durchschnitte, aufgrund der entsprechenden Absatzmengenverteilungen der unmittelbar vorhergehenden Jahre, nach Rohrarten und Bestellgewichten (Index m der Parameter A^1_{mk}) sowie Auftragszusammensetzungen und Bestellgewichten (Index n der Parameter A^2_{nk}) und nach Absatzbezirken aufgeteilt. Das Zurückgreifen auf Zahlen der Vergangenheit ist für die Anteile der verschiedenen Rohrweiten an den Absatzmengen der einzelnen Rohrtypen in aller Regel möglich, weil sich der Verwendungszweck einer Rohrtype und die Käufergewohnheiten nur langsam ändern. Nur in Ausnahmefällen wird eine Berichtigung der sich aus den Vergangenheitszahlen ergebenden Verteilungen notwendig sein, wenn besondere Ursachen, wie behördliche Verordnungen oder Gutachten, eine wahrscheinlich schnelle Änderung der Mengenanteile der einzelnen Rohrweiten mit sich bringen. Die regionale Absatzverteilung ist insbesondere von der Rührigkeit der einzelnen Vertreter abhängig. Eine besondere Prognoseunsicherheit entsteht bei einem Vertreterwechsel,

weil die Verkaufsfähigkeit eines neuen Vertreters nur schlecht vorhergesagt werden kann.

Besonders aufwendig ist die Ermittlung der Absatzstruktur, d.h. der Auftragszusammensetzung im Hinblick auf Bestellgewichte und Rohrarten. Da Absatzstatistiken, die nach den notwendigen Gesichtspunkten gegliedert sind, nicht vorliegen, ist es notwendig, die ursprünglichen Unterlagen der Einzelauftragsabrechnung stichprobenartig auszuwerten. Dabei ist gleichzeitig die dem Modell zugrunde zu legende, vereinfachte Nachfrage- und Lieferklasseneinteilung zu ermitteln. Es ist zweckmäßig, zunächst eine Vielzahl von Auftragszusammensetzungen und relativ kleine Gewichtsklassenbreiten für unterschiedliche Bestellmengen zu unterscheiden. Diese feine Gliederung wird man einer Strichliste zugrunde legen, in die zufällig ausgewählte Einzelaufträge der entsprechenden Vorjahre eingeordnet werden. Entsprechend der sich ergebenden Klassenbesetzungen können dann Klassen zusammengefaßt bzw. wegen geringer Besetzung weggelassen werden, bis eine vereinfachte Absatzstruktur entsteht, von der man intuitiv annimmt, daß sie im Hinblick auf die Genauigkeit der Abbildung und die Modelloperationalität, günstig ist. Aus der einmal festgelegten Struktur ergeben sich dann sofort die Koeffizientengruppen D^1 bis D^4.

Da wir uns bei der Definition von Absatzbezirken an die bestehende Einteilung des Absatzgebietes in Vertreterbezirke gehalten haben (vgl. Abschnitt 4413), ist es möglich die regionale Absatzverteilung mit Hilfe der zur Kontrolle der Vertreter geführten Umsatzstatistik zu ermitteln. Diese Umsatzstatistiken geben, für die einzelnen Rohrtypen getrennt, die Nettoumsätze (in Geldeinheiten pro Monat) der einzelnen Vertreter an. Um von diesen Werten durch entsprechende Zusammenfassung auf die Absatzmengenverteilung schließen zu können, muß vorausgesetzt werden, daß

1. alle Vertreter im gleichen Umfang Rabatte gewährt haben und

2. die Anteile der einzelnen Rohrarten an der Gesamtabsatzmenge einer Rohrtype in jedem Bezirk die gleichen waren.

52 Kostenparameter

521 Die Transportkostenkoeffizienten für den Werk-zu-Kunden-Transport

Die Transportkosten pro Mengeneinheit einer bestimmten Lieferkategorie l sind abhängig von den Tarifbestimmungen der verwendeten Transportmittel. Da diese für die einzelnen Transportmittel verschieden sind, muß für jede Rohrart festgestellt werden, welche Mengenanteile mit welchen Transportmitteln versandt werden. Die Transportmittel sind:

1. Speditions- und Vertrags-LKW (Wagenladungen),
2. Bundesbahn (Waggonladungen),
3. Bundesbahn (Stückgut).

Wie die Lieferkategorien l selbst lassen sich auch die Versandanteile der Transportmittel nur aus den Abrechnungen der Einzelaufträge der Vergangenheit ermitteln.

Die im Modell verwendeten Transportkostenkoeffizienten ergeben sich als gewogene arithmetische Mittel der für Bahn- und LKW-Versand bestimmten Koeffizienten, gewichtet mit den Mengenanteilen dieser Versandarten an der Gesamtversandmenge.

5211 Der Bahnwaggonversand

Die Tarifgestaltung beim Bahnwaggonversand[1] macht den Frachtpreis pro Mengeneinheit im wesentlichen abhängig von:

---

[1] Der Studie zugrunde gelegt sind die Verhältnisse des Jahres 1967

1. der Entfernung zwischen lieferndem Werk und Kunden,
2. dem Sendungsgewicht der Sendung zum einzelnen Kunden.

Der Berechnung der Entfernungen von den Werken zu den Absatzbezirken wird ein im Absatzbezirk zentral gelegener Ort zugrunde gelegt. Der Einfluß des Sendungsgewichts auf den Frachtpreis ist dadurch erfaßt, daß die Liefermengen im Hinblick auf das Sendungsgewicht strukturiert wurden. Innerhalb jeder Liefergewichtsklasse wird Gleichverteilung der Aufträge angenommen und für die jeweilige Klassenmitte aus den Tariftabellen für jeden Absatzbezirk der Frachtpreis (in Geldeinheiten pro Mengeneinheit) abgelesen.

5212 Der Bahnstückgutversand

Für den Bahnstückgutversand hat neben der Entfernung und dem Sendungsgewicht als 3. Gesichtspunkt die "Sperrigkeit" der Sendung Bedeutung. Sperrigkeitszuschläge werden berechnet, wenn das Gewicht pro Kubikmeter unter eine bestimmte Mindestgrenze fällt. Wenn eine Sendung sperrig ist, wird das tatsächliche Sendungsgewicht mit dem Faktor 1>1 multipliziert und von diesem fiktiven Gewicht der Frachtpreis ermittelt.

5213 Der LKW-Versand

Die wichtigste Versandart, der LKW-Versand, unterscheidet sich vom Bahnversand dadurch, daß die Berechnung des Frachtpreises nicht pro Sendung an einen Kunden, sondern insbesondere pro LKW-Transport erfolgt. Bei einem Transport können mehrere Kunden beliefert werden, wobei eine möglichst gute Raumnutzung des LKW angestrebt wird.

Die wichtigsten Tarifsätze sind:

1. für die gesamte LKW-Ladung: der 10-Tonnen-Satz bzw. der 5-Tonnen-Satz,
2. für die Sendung an den einzelnen Kunden: der Stückgutsatz.

In aller Regel werden bei der Abrechnung eines einzelnen Transports mehrere dieser Sätze angewandt. Die bei weitem am häufigsten angewandte Methode ist die folgende: Für die Gesamtladung wird ein Gesamtfrachtsatz bis zu einem "Knoten", das ist in der Regel der Wohnsitz des ersten belieferten Kunden, berechnet. Ab dem "Knoten" werden die weiteren Kunden zum Stückgutsatz beliefert.

Beispiel einer Transportabrechnung:

Lieferung von:	nach:	Entfernung in km:	Gewicht in kg:	Abrechnungssatz:	Preis in DM
Bogen	Stuttgart	321	3438	10-to-Satz	518,9
Stuttgart	Böblingen	26	730	Stückgutsatz	21,7
Stuttgart	Neckarzimm.	75	2355	Stückgutsatz	94,3

. . . .

Hier wurde Stuttgart als Knoten benutzt. Es wäre auch möglich, vom ersten Knoten ab einen weiteren Knoten abzurechnen. Solche Abrechnungen bilden aber die Ausnahme. Deshalb soll die im Beispiel gezeigte Abrechnungsart, d.h. Abrechnung der gesamten LKW-Ladung bis zu einem Knoten und Stückgutabrechnung für den einzelnen Kundenauftrag ab Knoten, als Grundlage der Bestimmung der Transportkostenkoeffizienten beim LKW-Versand benutzt werden.

Der Frachtpreis pro Mengeneinheit ist dann abhängig von:

1. der Entfernung zum Knoten,
2. der Gewichtsauslastung des LKW bis zum Knoten,
3. den Entfernungen vom Knoten zum jeweiligen Kunden,
4. dem Gewicht der Sendung für den einzelnen Kunden ab Knoten.

Als Entfernung zum Knoten werden die Entfernungen zum zentralen Ort des Absatzbezirkes (analog zum Bahnversand) benutzt. Für ein als gegeben anzunehmendes, durchschnittliches LKW-Volumen ergibt sich die Gewichtsauslastung eines LKW beim Transport einer bestimmten Lieferkategorie 1 vom Werk zum Knoten als Produkt aus

1. der durchschnittlich erreichbaren Raumauslastung des LKW – diese muß aus den Erfahrungswerten der Vergangenheit als Prozentsatz des LKW-Volumens geschätzt werden – und
2. der Sperrigkeit der zu transportierenden Rohre. (Für jedes Lieferprodukt muß hierzu das mögliche Ladungsgewicht pro Kubikmeter bestimmt werden.)

Damit kann zunächst der günstigste Frachtpreis pro Tonne für jede Rohrart und für jeden Absatzbezirk vom Werk zum Knoten aus den Tariftabellen festgestellt werden.

Das Sendungsgewicht zum einzelnen Kunden hat beim Versand zum Knoten keinen Einfluß auf die Transportkosten pro Mengeneinheit. Erst bei der Verteilung der LKW-Ladung auf die einzelnen Kunden verursacht das Sendungsgewicht Kostenunterschiede. Vereinfachend wird für alle Absatzbezirke gleich die durchschnittliche Entfernung ab Knoten als Stichprobe aus den Frachtabrechnungen der Vergangenheit ermittelt. Für diese Entfernung ergeben sich dann aus den Frachttabellen für die einzelnen Lieferklassen Kostenunterschiede pro Mengeneinheit als Folge der unterschiedlichen Gewichtsbereiche der Lieferklassen.

Durch Addition der Kosten pro Mengeneinheit des Transports zum und vom Knoten erhalten wir die Koeffizienten für den LKW-Transport.

522 Der Werk-zu-Werk-Transport

Beim Werk-zu-Werk-Transport sind zusätzlich zu den reinen Transportkosten auch die Lohnkosten der Be- und Entladung entscheidungsabhängig. Im Gegensatz zum Werk-zu-

Kunden-Transport ist es jedoch möglich große Sendungsgewichte zu realisieren und dadurch das zur Verfügung stehende Volumen eines Waggons bzw. LKWs voll zu nutzen. Damit lassen sich relativ günstige Frachtsätze pro Gewichtseinheit erzielen. Für die verschiedenen Rohrarten ergeben sich Frachtpreisunterschiede lediglich aufgrund unterschiedlicher, möglicher Ladungsgewichte pro Volumeneinheit des Transportmittels.

523 Die Kosten variabler Kapazitäten

Der Einfluß, den die Kosten variabler Kapazitäten — das sind insbesondere Düsensätze zur Rohrextrusion und Muffgeräte — auf die Entscheidung haben, ist wesentlich davon abhängig, auf welchen Zeitraum die Abschreibung bezogen wird. Als Anhalt können die Abschreibungssätze der Betriebsabrechnung dienen. Die Zinsen können in Höhe des in der Kostenrechnung verwendeten Kalkulationszinsfußes vom halben Anschaffungs- bzw. Wiederbeschaffungspreis berechnet werden.

Zu beachten ist insbesondere, daß die formulierten Nebenbedingungen dazu führen, daß Kosten nur für die Maschinen angesetzt werden, die wirklich bei der entsprechenden Produktionsverteilung eingesetzt werden müssen. Auf den vorhandenen Maschinenbestand, der möglicherweise überhaupt nicht benutzt wird (zumindest bei einer bestimmten Produktionsverteilung nicht benutzt wird), wird nicht abgestellt. Das heißt aber, daß angenommen wird, daß Kosten für nicht benutzte Maschinen nicht anfallen sondern z.B. durch Verkauf restlos abgebaut werden können. Diese Annahme ist nicht unbedingt realistisch. Sie ist aber, da sie eine eindeutige Abgrenzung zuläßt, günstiger als die Berücksichtigung des tatsächlichen Maschinenbestands. Würde auf den tatsächlichen Maschinenbestand abgestellt, dann müßten der Maschinenbestand, sein Zustand und die Verkaufsmöglichkeiten erfaßt werden.

524 Variable Lohnkosten

Im Modell wird der sprungfixe Charakter der Lohnkosten vernachlässigt. Stattdessen werden Kostenkoeffizienten definiert, die sich auf eine Mengeneinheit einer Fertigungskategorie i bzw. einer Lieferklasse l beziehen. Für die Arbeitertypen, für die Lohnkosten als Folge standortbedingter Lohnsatzunterschiede je nach der gewählten Produktionsverteilung in unterschiedlicher Höhe anfallen, ist daher zunächst der Arbeitsanfall (in Zeiteinheiten/Rohrmengeneinheit) zu erfassen.

Für die Arbeitertypen im Produktionsbereich, das sind Extruderfahrer, Kontrolleure, Vorarbeiter der Extrusionsabteilung und Betriebsschlosser, ist der Arbeitsanfall proportional der Zahl der eingesetzten Rohrstraßen. Damit bestimmt die Kapazität der zur Produktion eingesetzten Rohrstraßentypen den Arbeitsanfall pro gefertigter Rohrmengeneinheit mit. Die Besetzung einer Rohrstraße pro Schicht läßt sich im übrigen exakt angeben. Für die Arbeiter der Mufferei wird der Arbeitsanfall mit Hilfe der Akkordvorgabezeiten pro Muffe einer bestimmten Rohrart bestimmt. Die Muffzeiten pro Rohrmengeneinheit ergeben sich dann durch Multiplikation der Vorgabezeit pro Muffe mit der Muffenzahl pro Mengeneinheit der jeweiligen Rohrart.

Eine ähnlich exakte Zuordnung von Arbeitskräften zur Arbeitsmenge ist für die Lager- und Verladearbeiter nicht gegeben. Eine grobe Schätzung des Arbeitsanfalls pro versandte Mengeneinheit läßt sich dadurch gewinnen, daß die Zahl der in einem durchschnittlichen Monat tatsächlich geleisteten Lagerarbeitstunden eines Werkes durch die im gleichen Zeitraum der Vergangenheit versandte Menge dividiert wird.

Die Lohnsätze, die pro Arbeiter eines bestimmten Typs in einem Werk anzusetzen sind, umfassen:

1. den Effektlohn, der sich zusammensetzt aus dem Tariflohn und den Zulagen: freiwillige-, Treue- und Mehrarbeitszulage.
2. den Arbeitgeberanteil zur Sozialversicherung und Berufsgenossenschaftsbeiträge.

Explizit treten im Modell nur die entscheidungsabhängigen Lohnkosten des Produktionsbereiches als Koeffizienten der Variablen X_{ij} auf. Die Koeffizienten sind die mit den pro Mengeneinheit anfallenden Arbeitszeiten gewichteten Lohnsätze der entsprechenden Arbeitertypen (Extruderfahrer, Kontrolleure, Vorarbeiter der Extrusionsabteilung, Betriebsschlosser). Die Koeffizienten für Lager- und Verladearbeiter sind mit den entsprechenden Transportkostenkoeffizienten des Werk-zu-Werk- und Werk-zu-Kunden-Transports verrechnet.

53 Sonstige technische Parameter

531 Parameter zur Beschreibung der Lagerkapazität der Werke

Die Lagerpolitik des Unternehmens hat u.a. das Ziel, während des Saisontiefs durch Lageraufbau und während des Hochs durch Lagerabbau eine zwar nicht vollständig gleichmäßige, aber doch gegenüber den starken saisonalen Absatzschwankungen weit geringer schwankende Monatsproduktion zu erreichen. Zu diesem Zweck werden die jahresdurchschnittlichen Lagergrundzahlen für die einzelnen Produkte mit Hilfe saisonabhängiger Koeffizienten zu monatlichen Lagersollzahlen korrigiert (vgl. Abschnitt 4325). Aus den Lagersollzahlen des Saisontiefs kann ermittelt werden, für welchen Bruchteil der Jahresliefermenge eines Werkes seine Lagerfläche ausreichen muß. Da es bei der Einhaltung der Lagerflächen-Restriktionen nicht auf eine exakte, sondern eine nur größenordnungsmäßige Einhaltung der Nebenbedingungen ankommt, genügt es, einen entsprechenden Faktor auf der Basis des Verhältnisses von Lagersollzahlen zu Lagergrundzahlen nur

einiger, wichtiger Rohrarten zu berechnen. Es ist zweckmäßig, diesen Faktor auf die rechten Seiten der Lagerrestriktionen zu ziehen und mit den vorhandenen Lagerflächen der Werke zu verrechnen. Daneben müssen Lagerkoeffizienten (E_l^1 vgl. Abschnitt 4422) ermittelt werden, die für die einzelnen Lieferklassen l den Lagerflächenbedarf (in Flächeneinheiten/Rohrmengeneinheit) angeben. Diese Koeffizienten hängen ab von Rohrweite, -wandstärken und – daraus folgend – möglichen Stapelprinzipien und Stapelhöhe.

532 Parameter zur Beschreibung der Produktionskapazität der Werke

Eine vollkommen gleichmäßige Produktion wird durch den Lagerauf- und -abbau weder erreicht noch angestrebt. Bereits die hier als gegeben angenommene, jährliche Kapazitätsplanung für das Unternehmen als Ganzes, die auf der Vorhersage der Jahresabsatzmengen aufbaut, trifft die grundsätzliche Entscheidung darüber, um welche Prozentsätze die zu schaffenden Jahreskapazitäten die jährliche Produktionsmenge übersteigen sollen. Bei der Bestimmung der Werkskapazitäten gehen wir davon aus, daß ein dieser Planung entsprechender Kapazitätspuffer in beiden Werken einzuplanen ist. Das heißt, daß die technischen Kapazitäten

- der Rohrstraßen und
- der Rohmaterialmischanlagen

entsprechend der obigen Prozentsätze zu berichtigen sind. Daneben ist eine Korrektur für Ausschußproduktion notwendig.

Die Ermittlung des Platzbedarfs pro Rohrstraße und die Ermittlung der Fertigungshallengrößen ist problemlos.

533 Kapazitäten und Produktionskoeffizienten entscheidungsabhängiger Kapazitätskosten

Die Koeffizienten G^1_{ip} (i=1,...,15; p=1,...,9) geben an, welcher Bruchteil der Kapazität von Düsensätzen, Rohrköpfen oder Muffgeräten durch eine Mengeneinheit der Rohrart i verbraucht wird (in Kapazitätseinheiten/Rohrmengeneinheit), wobei die Kapazität einer Faktoreinheit mit F_p bezeichnet wird (in Kapazitätseinheiten/Faktoreinheit und Jahr). Als Kapazitätseinheit können Fertigungsstunden dienen. Düsensätze und Rohrköpfe sind Zusatzgeräte der Rohrstraßen. Die Produktionskoeffizienten entsprechen daher dem reziproken Wert der Produktionsgeschwindigkeit der verwendeten Rohrstraßen. (Die Produktionsgeschwindigkeit hat die Dimension: Rohrgewichtseinheiten/Fertigungsstunde.) Bei den Muffgeräten können die Akkordvorgabezeiten zur Herstellung einer Muffe für eine bestimmte Rohrweite und -type als Grundlage zur Bestimmung der Koeffizienten dienen. Die Vorgabezeiten werden zunächst mit der Muffenzahl pro Rohrmengeneinheit der entsprechenden Rohrart multipliziert.

Die Bestimmung der Koeffizienten G^1_{ip} auf der Grundlage obiger Daten wird jedoch umständlich, da jeweils mehrere Rohrweiten einer Rohrtype zu einer Rohrart zusammengefaßt wurden, um die Zahl der Rohrarten zu verringern (vgl. Abschnitt 4411). Es ist daher notwendig, die für einzelne Rohrweiten ermittelten Koeffizienten mit den Anteilen der verschiedenen Rohrweiten an einer Mengeneinheit einer Rohrart zu multiplizieren.

6. MODELLAUSWERTUNG

61 Das Optimierungsproblem

Das formulierte Modell ist vom gemischt-ganzzahligem Typ. Ohne Slack-Variable hat die Matrix 470 Zeilen, 910 Spalten und rund 5000 von 0 verschiedene Matrixeinträge. 18 der Variablen sind 0-1 Variable. Die Chancen ein solch umfangreiches Problem bei vertretbarem Rechenaufwand mit einem Branch-Bound-Verfahren zu lösen, müssen als sehr klein angesehen werden. Bereits die Lösung des linearen Teilproblems für eine bestimmte zulässige Kombination der 0-1 - Variablen verbraucht bei Anwendung des IBM-Programms MPS-360 auf dem sehr großen Rechner IBM 360/91 etwa 75 sec reine Rechenzeit (CPU-Zeit).

Nur in Fällen, bei denen bereits durch scharfe Restriktionen die Zahl möglicher Alternativen sehr klein ist, bzw. wenn es gelingt eine "Verzweigungsstrategie" zu entwickeln, die in wenigen Schritten zum Optimum führt, dürfte ein direkter Lösungsversuch erfolgreich sein.

Als Näherungslösung wäre daran zu denken, das entsprechende, rein lineare Problem zu lösen, bei dem die 0-1 - Variablen durch stetige Variable ersetzt werden, für die verlangt wird

$$0 \leq z_{ij} \leq 1 \ . \qquad (6.1)$$

Eine solche Änderung des Modellinhalts setzt jedoch den Aussagewert des Modells stark herab. Die entscheidungsabhängigen Kosten der "nicht genutzten Kapazität" entstehen allein deshalb, weil die Werkzeugkapazitäten nicht beliebig teilbar sind. Die Unteilbarkeit der Kapazitäten wird aber gerade durch die Ganzzahligkeit der 0-1 - Variablen erfaßt. Aus der stetigen Lösung fällt der Einfluß der entscheidungsabhängigen Kosten der nicht genutzten Kapazität heraus. Der relevante Teil der Lösung ist identisch mit der Lösung eines Modells,

das die Hilfsvariablen Z_{jp} des Abschnitts 4433 überhaupt nicht enthält.

Trotzdem ist es sicher sinnvoll, nicht nur einige zulässige Alternativen nach Plausibilitätsüberlegungen herauszusuchen und diese zu bewerten, sondern das große Potential der linearen Programmierung zu nutzen. Ein möglicher Weg wäre, entsprechend der von HANSSMANN beschriebenen Ölstudie[1], für einige nach Plausibilitätsüberlegungen herausgesuchte Kombinationen der ganzzahligen Variablen, das jeweilig sich ergebende lineare Programm zu lösen. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, daß der Lösungsraum nicht systematisch nach guten Kombinationen der ganzzahligen Variablen abgesucht wird. Im folgenden wird versucht, die Suche durch ein gemischt- ganzzahliges Grobmodell zu erleichtern.

62 Entwicklung eines Grobmodells

Eine Vergröberung des ursprünglichen Modells muß sich vor allem auf die Erfassung des Transportteils beziehen, der 862 Variable und 423 Restriktionen verursacht. Wir nehmen vereinfachend an, daß die Transportkosten der 8 vom Absatz her unterschiedenen Rohrarten (vgl. Abschnitt 4411) nicht davon abhängen, ob bestimmte Rohrarten, die zusammen bestellt werden, auch zusammen geliefert werden. Für eine gegebene Produktionsverteilung auf beide Werke lassen sich die Transportkosten dann als Summe der Kostenminima von 8 unabhängigen Transportmodellen errechnen.

Für unterschiedliche Verteilungen der Produktion einer Rohrart auf beide Werke können wir die Transportkostenminima mit Hilfe eines Teilmodells, das entsprechend aus dem ursprünglichen Modell herausgeschnitten ist und den

---

[1] HANSSMANN, F., a.a.O., S.66 f.

Werk-zu-Kunden- und Werk-zu-Werk-Transport umfaßt, bestimmen. Stellt man die Kosten als Funktion der in Werk 1 produzierten Menge dar, so ergibt sich regelmäßig ein U-förmiger Kostenverlauf.

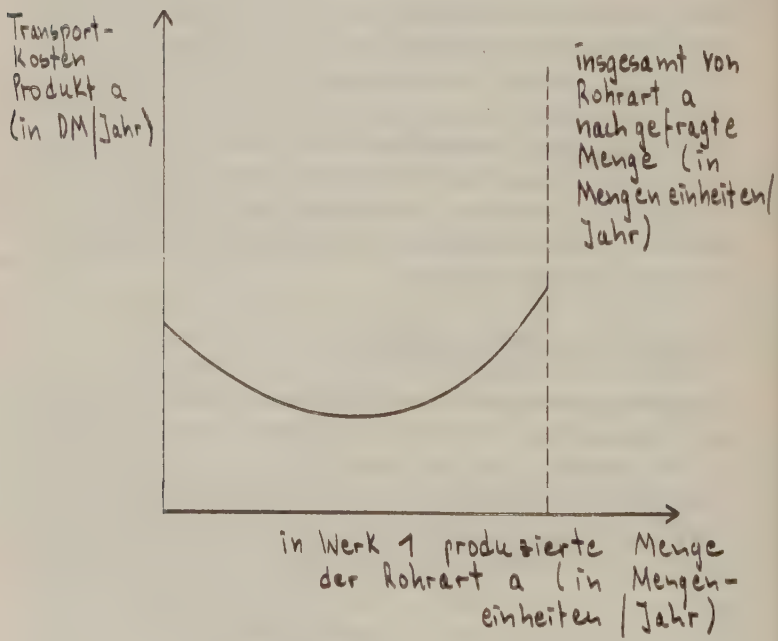

Abb. (b)

Die sich ergebenden Transportkostenfunktionen sind konvex und als Folge der oben gemachten Unabhängigkeitsannahme separabel. FÜr diesen Fall kann durch stückweise, lineare Approximation der Kostenkurven ein globales Ko-

stenminimum ermittelt werden.[1] [2] Im folgenden wurden die Teilkostenkurven jeweils durch drei lineare Teilstükke angenähert. (Auch eine exaktere Annäherung wäre vertretbar, weil dadurch nur die Zahl der Variablen, nicht aber die der Restriktionen vergrößert wird. Die Rechenzeiten hängen aber, wenn die Zahl der Variablen ohnehin größer ist als die Zahl der Restriktionen, in viel stärkerem Maße von der Zahl der Restriktionen, weniger von der Zahl der Variablen ab.)

Wir bezeichnen mit

G_{ta}, I_{ta} die Koordinaten der Eckpunkte, der linear approximierten Teilkostenkurve für die Rohrart $a = 1,\ldots,8$, wobei $t = 1,\ldots,4$ die gewählten Eckpunkte spezifiziert.
H_{ta} kennzeichnet die dem Eckpunkt t entsprechende Produktionsmenge (in Rohrmengeneinheiten/Jahr) der Rohrart a in Werk 1. Die Produktionsmenge kann schwanken zwischen $H_{1a} = 0$, d.h. die Rohrart wird nur in Werk 2 gefertigt, und H_{4a} entspricht der erwarteten jährlichen Gesamtnachfrage nach Rohrart a , d.h. die Rohrart wird nur in Werk 1 gefertigt. I_{ta} ist der Transportkostenwert (in Geldeinheiten/Jahr) des entsprechenden Eckpunktes.

D^5_{ai} dimensionslose Koeffizienten, die angeben, ob eine Rohrart a $(a=1,\ldots,8)$ einer von der Produktion her detaillierter unterschiedenen Rohrart i $(i=1,\ldots,15)$ entspricht. Die Koeffizienten nehmen lediglich die Werte 0 oder 1 an.

---

1) Die folgende Formulierung erfolgt in Anlehnung an DANTZIG,G.B., a.a.O., S.547 ff.

2) Eine Darstellung dieses und anderer Ansätze zur Lösung separabler Probleme gibt: MÜLLER-MERBACH,H.: Die Methode der "direkten Koeffizientenanpassung" (μ-Form) des Separable Programming, in: Unternehmensforschung, Band 14, Heft 3, 1970, S.197-214

V_{ta} dimensionslose Hilfsvariable, die dazu dienen, den approximierten Funktionswert an einer beliebigen Stelle im Bereich zwischen H_{1a} und H_{4a} als Linearkombination der Funktionswerte an benachbarten Eckpunkten darzustellen, wobei $t=1,\ldots,4$ und $a=1,\ldots,8$.

Da es sich um ein konvexes Problem handelt und ein Minimum bestimmt wird, werden die Nachbarschaftsbedingungen immer erfüllt.

Zunächst gilt

$$V_{ta} \geq 0 \quad \text{für } a=1,\ldots,8;\ t=1,\ldots,4 \tag{6.2}$$

und

$$\sum_t V_{ta} = 1 \quad \text{für } a=1,\ldots,8 \tag{6.3}$$

Um die notwendige Datenumorganisation vom ursprünglichen Modell zum Grobmodell klein zu halten, nehmen wir einen zusätzlichen (im Grunde vermeidbaren) Satz Nebenbedingungen in das Modell auf:

$$\sum_t H_{ta} \cdot V_{ta} = \sum_i D_{ai} \cdot X_{i,} \quad \text{für } a=1,\ldots,8 \tag{6.4}$$

Damit kann der gesamte, die Produktion kennzeichnende Teil des ursprünglichen Modells im Grobmodell verwendet werden. Der den Transport kennzeichnende Zielfunktionsterm ist

$$\sum_{ta} I_{ta} \cdot V_{ta} \tag{6.5}$$

so daß die approximierte Zielfunktion lautet:

$$GK' = \sum_{ta} I_{ta} \cdot V_{ta} + \sum_{jm} Z_{jm} \cdot C^3_{jm} + \sum_{ij} X_{ij} \cdot C^4_{ij} \tag{6.6}$$

Die zu berücksichtigenden Nebenbedingungen sind 6.2, 6.3, 6.4 und aus dem ursprünglichen Modell die Bedingungen 4.6, 4.7, 4.8, 4.12, 4.13, die die Mischerkapazitä-

ten, Rohrstraßen, Fertigungshallengrößen und die Ganzzahligkeit der Variablen Z_{im} betreffen. Hinzu kommen Nebenbedingungen, die sicherstellen, daß Nachfragemengen, die nicht in Werk 1 produziert werden, im Werk 2 zu fertigen sind.

$$\sum_{ij} D^{5}_{ai} \cdot X_{ij} = H_{4a} \quad \text{für alle } a=1,\ldots,8 \qquad (6.7)$$

Insgesamt erhalten wir 80 Variable, davon sind 18 0-1 Variable, und 52 Restriktionen.

Das vereinfachte Modell vergröbert bzw. vernachlässigt drei Gesichtspunkte:

1. Die Transportkosten der einzelnen Rohrarten sind approximiert.
2. Die Beziehungen zwischen den Transportkosten der einzelnen Rohrarten, die darin bestehen, daß die Kosten auch davon abhängen, welche Rohrarten zusammen in einer Sendung transportiert werden, sind nicht erfaßt. Das heißt, im ursprünglichen Modell ist "Separabilität" nicht gegeben.
3. Da das Grobmodell auf die Produktions-, nicht auf die von einem Werk versandten Mengen abstellt, die die Lagerhaltung betreffenden Nebenbedingungen sich aber auf die Versandmengen beziehen, werden die betreffenden Nebenbedingungen weggelassen.

63 Auswertung des Grobmodells

Die Informationen, die aus dem Grobmodell gezogen werden sollen, sind Kombinationen der 0-1 Variablen, die gute Lösungen des Gesamtmodells versprechen. Andere Informationen, die im Grobmodell enthalten sind, so über Produktionsmengen, Produktions- und Transportkosten, können aus der sich anschliessenden Lösung des linearen

Teils des ursprünglichen Modells genauer ermittelt werden.[1]

Zunächst versuchen wir die Übereinstimmung von Grob- und ursprünglichem Modell zu testen. Hierzu werden die ganzzahligen Variablen auf bestimmte 0-1 Kombinationen fixiert, und der lineare Teil beider Modelle wird mit Hilfe des IBM-Programms MPS/360 insgesamt viermal optimiert. Die Tabelle 2 zeigt eine relativ gute Übereinstimmung insbesondere der Zielfunktionswerte, aber auch der Produktionsmengen, wenn man von Unterschieden im Produktionsverfahren absieht. (Das gleiche Absatzprodukt betreffen: $i = 1,2$; $i = 3,4$; $i = 5,6$; $i = 9.10$; $i = 11,12$; $i = 13,14,15$).

Wichtig für die weiteren Überlegungen sind die sich für beide Modelle ergebenden Rechenzeiten zur Optimierung des linearen Problems. Sie betragen für das ursprüngliche Modell rund 75 Sekunden, für das Grobmodell knapp 1 Sekunde reiner CPU-Zeit bei Verwendung des Rechners IBM 360/91; d.h., daß wir uns bei der Optimierung des linearen Teil des ursprünglichen Modells auf sehr wenige Läufe beschränken müssen.

---

[1] Zu beachten ist, daß sich alle folgenden Zahlenangaben auf die Daten des konkreten Falls beziehen. Die Probleme der Datengewinnung wurden im Abschnitt 5 besprochen. Auf die explizite Auflistung der Daten wird insbesondere wegen des großen Umfangs des Datenmaterials verzichtet. Das gleiche gilt für den sehr umfangreichen Rechnerausdruck. (Immerhin wurden 26 lineare Optimierungsprobleme von der Größenordnung 80 × 52 und 6 von der Größenordnung 910 × 470 gelöst.) Die folgenden Tabellen enthalten nur die Angaben, die zur Interpretation des Lösungsweges und der Endergebnisse notwendig sind.

abelle 2

ergleich der Lösungen[1] des Grobmodells und des ursprünglichen odells für gleiche Wertkombinationen der 0-1 Variablen[2] im inblick auf die Produktionsmengen in Werk 1[3] und den Zielunktionswert (Mengen in to/Jahr, Zielfunktionswert in 00 DM/Jahr)

	Alternative							
	1		2		3		4	
	Modelltyp							
	grob	urspr.	grob	urspr.	grob	urspr.	grob	urspr.
elfunktionswert	9599	9578	9451	9634	9282	9289	8904	8799
Produkt i = 1	158						37	
2	532	687	360	276	360	367	653	516
3	940	925			570	567	121	203
4	110	126					449	576
5				225	460	462	300	297
6			300	126				
7			465	516	300	368	500	446
8			550	580	350	468	550	517
9	1420	1420	1610	1420	1420	1420	1759	1870
10	2970	2970	2780	2970	2970	2970	981	998
11		180						
12	180		180	180	180	62	87	120
13	22							
14		8		9	79	105		86
15	128	138	150	137	21		100	23
Gesamt	6460	6454	6395	6439	6710	6789	5537	5652

ußnoten zu Tabelle 2 auf Seite 100

Die ideale Auswertung des Grobmodells wäre seine Optimierung. Hierzu stand lediglich ein von IBM entwickeltes Programm "Branch and Bound Mixed Integer Programming – BBMIP" von 1967 zur Verfügung. Dieses in FORTRAN IV für IBM/360-Rechner geschriebene Programm eignet sich – laut zugehöriger Beschreibung – zur Lösung von Problemen "begrenzter Größe", wobei als wichtige Problemgrenzen angegeben werden:

1. Die Kernspeichergröße

   Die Kernspeichergröße wird als wichtigste Beschränkung der Problemgröße angegeben, weil es notwendig ist, die den einzelnen Entscheidungspunkten entsprechenden Zwischentableaus zu speichern. Für das benutzte System IBM 360/91 ist bei der gegebenen Prob-

---

Fußnoten zu Tabelle 2 auf Seite 99

[1] Optimierung der linearen Modellteile mit IBM-Programm MPS/360. Mit Ausnahme der Zeile: "Zielfunktionswert" enthält die Tabelle nur Mengenangaben.

[2]

Die den Alternativen zugrundeliegenden Werte der jeweils 18 0-1 Variablen sind:

Alt.	Variable 1,.....,18
1	0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
2	0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1
3	1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
4	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

[3] Damit die gegebene Nachfrage erfüllt werden kann, müssen nicht in Werk 1 produzierte Mengen in Werk 2 gefertigt werden. Aus der Angabe der Produktionsmengen in Werk 2 kann "wenig" zusätzliche Information bezüglich der Übereinstimmung beider Modelle gezogen werden. Deswegen können die Angaben auf Produktionsmengen in Werk 1 beschränkt werden.

lemgröße (80 Variable, davon 18 0-1 - begrenzt, 52 Restriktionen) die Kernspeichergröße nicht ein entscheidender Engpaß.

2. Die Rechenzeit

Die Zahl der Iterationen und damit die Rechenzeiten hängen insbesondere davon ab, wie nahe die Lösung des kontinuierlichen Problems der Lösung des gemischt-ganzzahligen Problems kommt, d.h. daß die Rechenzeiten dann besonders groß werden, wenn die mit ganzzahligen Variablen verbundenen, entscheidungsabhängigen Kosten einen relativ großen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Dieser Sachverhalt kann grob an einigen, zum Programmtest benutzten Beispielen verdeutlicht werden. (vgl. Tabelle 3 auf Seite 102) Die den Kostenverhältnissen des Falls zugrunde liegenden Kostenkoeffizienten für kontinuierliche und 0-1 Variable wurden mit dem Niveau 100 gekennzeichnet. Wir halten fest, wie sich die Zahl der zur Optimierung notwendigen Iterationen verändert, wenn die Niveaus beider Koeffizientengruppen durch Multiplikation der entsprechenden Koeffizienten mit einem Faktor getrennt variiert werden. Anzumerken ist, daß der Rechner IBM 360/91 in der Sekunde zwischen 25 und 35 Iterationen durchführte.

Aus der im Programm verwendeten Verzweigungsstrategie, die ganzzahlige Variable "günstig" im Hinblick auf die damit verbundene Änderung des Zielfunktionswertes rundet, läßt sich zur Erklärung und in Ergänzung zu den oben dargestellten Abhängigkeiten absehen, daß eine Lösung in den Fällen besonders schnell gefunden wird, in denen bereits aus der kontinuierlichen Lösung durch einfaches Runden eine gute gemischt-ganzzahlige Lösung abgelesen werden kann und umgekehrt.

Weit grundsätzlicher als durch die angegebenen Beschränkungen wird die Anwendbarkeit aber durch die Programmgenauigkeit beeinträchtigt. Das Programm ist in einfacher Genauigkeit geschrieben. Man könnte daher vermuten, daß,

Tabelle 3

Zahl der Iterationen in Abhängigkeit vom Kostenniveau der Kostenkoeffizienten verschiedener Variablengruppen

Kostenniveau der Koeffizienten der Variablengruppe:		Zahl der Iterationen[1]
0-1	stetig	
100	200	210
100	150	317
100	100	464
200	100	566
1000	100	4324[a]

[1] Eine kontinuierliche Lösung, die Ausgangspunkt und "lower bound" für das anschließende Branch-Bound-Verfahren ist, wurde regelmäßig nach rund 110 Iterationen gefunden.

[a] Die Rechnung wurde nach 4324 Iterationen ohne das Erreichen eines "Optimums" abgebrochen.

wenn zur Bestimmung einer als "optimal" bezeichneten Lösung des Grobmodells die in Tabelle 3 angegebenen Zahlen von Iterationen notwendig sind, auftretende Ungenauigkeiten durch Rundungsfehler entstehen könnten. In der Tabelle 4 sind die vom Programm als optimal bezeichnete Lösung und weitere relativ zu dieser Lösung gute Lösungen im Hinblick auf den Zielfunktionswert und die sich ergebenden Kombinationen der 0-1 Variablen festgehalten.

Mit Hilfe einer auf der folgenden Überlegung aufbauenden Programmänderung wurde versucht, möglichst alle Lö-

Tabelle 4

Optimierung des Grobmodells mit Hilfe des "Branch of Bound Mixed Integer Programming" (BBMIP)
Zielfunktionswert in 100 DM/Jahr und sich aus der Lösung ergebende Kombinationen der 0-1 Variablen.

Produktionsfaktor Nr.	Lösung Nr. 1	2	3	4
	Zielfunktionswert in 100 DM			
	9181	9206	9208	9236
1	1	1	1	1
2	1	1	1	0
3	1	1	0	1
4	1	1	1	1
5	0	0	0	1
6	1	1	1	1
7	1	1	1	1
8	1	1	1	1
9	1	1	1	1
10	0	0	0	0
11	0	1	1	1
12	1	1	1	1
13	1	1	1	1
14	1	1	1	1
15	1	1	1	1
16	1	1	1	
17	1	1	1	1
18	1	1	1	1

sungen, die vom Programm als gut klassifiziert werden können, zu ermitteln und auszudrucken. Sobald der Branch-Bound-Algorithmus des Programms eine erste, zulässige, nicht notwendigerweise optimale Lösung des gemischt-ganzzahligen Problems gefunden hat, wird deren Zielfunktionswert als "upper bound" benutzt. Immer dann, wenn sich bei der weiteren Rechnung ein Zielfunktionswert ergibt, der gleich oder größer als der "upper bound" ist, wird der entsprechende Zweig nicht weiter verfolgt. Nur, wenn eine zulässige Lösung gefunden wird, deren Zielfunktionswert kleiner als der gesetzte "upper bound" ist, wird die Lösung ausgedruckt und der neue "upper bound" gleich dem verbesserten Zielfunktionswert gesetzt. Dieses Verfahren hat zur Folge, daß insbesondere nach der Ermittlung einer optimalen Lösung des Grobmodells weitere gleich gute oder nur wenig gegenüber dem Optimum abfallende Lösungen nicht festgehalten werden. Desgleichen werden gute Lösungen vor Erreichen des Optimums nicht ausgewiesen, wenn bereits eine nahezu optimale Lösung zur Setzung eines entsprechenden "upper bound" geführt hat. Die Berechnung und der Ausdruck "guter" Lösungen läßt sich nun nach Kenntnis der vom Programm als optimal bezeichneten Lösung durch nochmalige Anwendung des Programms erreichen, wobei

a) als "upper bound" ein unter Berücksichtigung des bekannten Optimums gesetztes Anspruchsniveau für Zielfunktionswerte gesetzt wird und

b) die Routine, die den "upper bound" aufgrund verbesserter Lösungen ändert, umgangen wird.

Die Prüfung der gefundenen Lösungen auf rechnerische Richtigkeit mit Hilfe des sehr zuverlässig arbeitenden linearen Programms MPS/360 ergab (vgl. Tabelle 5):

1. Bereits die vom Programm "BBMIP" als erster Schritt ermittelte, kontinuierliche Lösung weist Unterschiedemgegenüber der mit Hilfe des MPS/360 ermittelten Lösung des gleichen Grobmodells auf. Das heißt, daß selbst für den Fall, daß das anschließende Branch-

Tabelle 5

Vergleich der Zielfunktionswerte bei Lösung des Grobmodells mit den Programmen BBMIP und MPS/360 anhand der jeweiligen kontinuierlichen Lösung und der gemischtganzzahligen Lösungen 1 - 4 der Tabelle 4 (Zielfunktionswert in 100 DM/Jahr)

Lösung	angewendetes Programm	
	BBMIP	MPS/360
kontinuierliche	8711	8211
ganzzahlige Nr. 1	9181	9476
2	9206	9513
3	9208	9524
4	9236	9217

Bound-Verfahren zuverlässig arbeitet, keine exakte Lösung des Grobmodells erwartet werden kann.

2. Der Vergleich der für gleiche Kombinationen der 0-1-Variablen ermittelten Zielfunktionswerte beider Programme zeigt entsprechende Abweichungen.

Zu bedenken ist jedoch, daß der Beitrag des gemischtganzzahligen Programms "BBMIP" selbst dann positiv zu bewerten wäre, wenn trotz der Ungenauigkeiten Kombinationen von 0-1 Variablen ermittelt würden, die zu besseren, exakten Lösungen des Grobmodells führen als die Auswahl von Kombinationen der 0-1 Variablen aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen bzw. das "Hintasten" zu guten Kombinationen aufgrund bereits vorhandener Lösungen.

Bereits das mit dem Programm MPS/360 berechnete, vierte Testergebnis für das Grobmodell, das in Tabelle 2 dargestellt wurde, ist kostengünstiger als die günstigste, mit Hilfe des Programms BBMIP gefundene und mit Hilfe des Programms MPS/360 genauer berechnete Lösung. Das Programm BBMIP ist somit zur Auswertung des Grobmodells unbrauchbar.

Wir sind damit auf die Auswahl von Kombinationen der 0-1 Variablen aufgrund von PlausibilitätsÜberlegungen zurückgeworfen. Es wurde wie folgt verfahren:

1. Auswahl von Kombinationen der 0-1 Variablen aufgrund:

   a) Der Zielfunktionskoeffizienten der 0-1 Variablen. Je höher diese Koeffizienten, umso größer ceteris paribus die Tendenz die entsprechende Variable gleich Null zu setzen.

   b) der kontinuierlichen Lösung. Es scheint plausibel, daß die Fixierung einer 0-1 Variablen auf den Wert 0 oder 1 dann den Zielfunktionswert wenig erhöht, wenn der Wert, der der entsprechenden kontinuierlichen Variablen zugewiesen wird, bereits annähernd 0 oder 1 ist.

   Die nach diesen Überlegungen ausgewählten Kombinationen von 0-1 Variablen mit den zugehörigen Lösungen des linearen Teils des Grobmodells sind in Tabelle 6 zusammengefaßt.

2. Für die Kombinationen, die zu einem kleinen Zielfunktionswert führen, werden alle dazwischen liegenden und angrenzenden Kombinationen untersucht. Wir erhalten die Lösungen der Tabelle 7.

Das Verfahren wurde bereits an dieser Stelle abgebrochen.

Die gemachten Erfahrungen zeigen, daß es nützlich wäre, wenn ein schnell und exakt arbeitendes Programm wie das MPS/360 ohne großen Aufwand als Unterprogramm genutzt werden könnte. Die im Einzelfall sinnvollen Verzweigungs-Überlegungen könnten zumindest in Form eines heuristi-

Tabelle 6

Optimierung des linearen Teils des Grobmodells für alternative Kombinationen der 0-1 Variablen[1)]
(Zielfunktionswert in 100 DM/Jahr)

	Alternative									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0-1 Variable 1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
3	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
4	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
5	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
6	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
8	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zielfunk-	9484		8861		9040		8897		8847	
tionswert		9281		8886		8963		9044		8957

1) Bei der Auswahl der Alternativen sind die in den Tabellen 2,4 und 5 zusammengefaßten, bereits vorliegenden Ergebnisse mit berücksichtigt, die darauf hinweisen, daß "0" im Bereich 10-18 zu hohen Zielfunktionswerten führen.

Tabelle 7

Optimierung des linearen Teils des Grobmodells für alternative Kombinationen der 0-1 Variablen[1)]
(Zielfunktionswert in 100 DM/Jahr)

	Alternative												
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23[2)]
0-1 Variable 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1
3	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
4	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zielfunktionswert	8844	8781	8867	8810	8865	8995	8904	8860	8840	8836	8819	8874	9301

1) Ausgewählt auf der Grundlage der Ergebnisse Tabelle 6

2) Zur Vervollständigung guter Alternativen: Testergebnis 4 Tabelle 2

schen Verzweigungsverfahren systematisiert und zur Auswahl günstiger Kombinationen der ganzzahligen Variablen genutzt werden, für die dann ein entsprechendes, lineares Programm berechnet werden könnte.

64 Auswertung des ursprünglichen Modells

Für die Kombinationen der 0-1-Variablen, die sich aufgrund der Lösung des Grobmodells als günstig erwiesen haben, kann der lineare Teil des ursprünglichen Modells optimiert werden. Wir benutzen dazu wiederum das von IBM entwickelte Programm MPS/360.

Die notwendige Loch- und Prüfarbeit, die wegen des Umfangs der Matrix bei nur manueller Ausführung sehr zeitraubend sein könnte, kann dabei stark abgekürzt werden, da der umfangreiche Transportteil der Matrix eine besonders einfache Struktur aufweist, die es erlaubt, die erforderlichen Datenkarten mit Hilfe eines kleinen Programms stanzen zu lassen.

Die jeweilige Kombination der 0-1-Variablen wird durch Fixieren der entsprechenden Variablen auf die gewünschten Werte erreicht. Die Rechenzeit (reine CPU-Zeit) für ein Problem betrug auf dem Rechner IBM 360/91 etwa 75 Sekunden. Dieser verhältnismäßig große Zeitaufwand macht es notwendig, die Optimierung auf wenige, alternative Kombinationen der 0-1-Variablen zu beschränken.

Der sehr umfangreiche Ergebnisausdruck ist wenig anschaulich.[1] Auf eine Wiedergabe wird daher verzichtet.

---

[1] Eine klare und detaillierte Erläuterung des IBM-Systems MPS/360, insbesondere eine Erläuterung und Interpretation des Ergebnisausdrucks findet sich in: Informationen für die Landwirtschaftsberatung in Baden-Württemberg, LT Brief No.2, Sept. 1968, hrsg. von der Landesanstalt für die Anpassung der Landwirtschaft mit Landesstelle für landwirtschaftl. Marktkunde, Donaueschingen.

Hinzu kommt, daß Ergebnisse ohnehin nicht als eine im Detail auszuführende Verhaltensempfehlung aufgefaßt werden dürfen. Wichtige Gründe dafür sind:

1. Eine optimale Lösung des Modells ist optimal in Bezug auf die prognostizierten, unsicheren Modellparameter. Wenn die tatsächlich eintretenden Daten von den prognostizierten Werten abweichen, führt eine zahlenmäßig detaillierte Ausführung der Lösung nicht notwendig zu einer besonders guten Lösung.

2. Die Lösung muß zudem in praktikable Verhaltensempfehlungen, die mit vertretbarem Kontrollaufwand zu realisieren sind, umgesetzt werden. Eine zunehmend exaktere Realisation einer Alternative lohnt sich nur, solange der dadurch verursachte Kontrollmehraufwand die erzielbaren Einsparungen nicht überkompensiert.

Durch die Optimierung des linearen Teils des ursprünglichen Modells erhalten wir:

1. eine genauere Bewertung der mit Hilfe des Grobmodells ermittelten Alternativen, die wir in Bezug auf die darin spezifizierten Kombinationen der 0-1-Variablen ausgewertet haben,

2. für jede alternative Kombination der 0-1-Variablen eine optimale Verteilung der Produktion auf beide Werke, d.h. die Produktionsprogramme der Werke und

3. durch Berücksichtigung des Werk-zu-Werk-Transports davon abweichende Lieferprogramme der Werke,

4. die sich aus den Punkten 2. und 3. ergebende Ausnutzung der Produktions- und Lagerkapazitäten der Werke,

5. den jeweils kostengünstigsten Lieferort für die nach Produktarten, Auftragszusammensetzungen und Bestellmengen untergliederte Nachfrage der einzelnen Absatzbezirke.

Die wichtigsten Informationen zu den Punkten 1. - 4. sind in den Tabellen 8 und 9 für jeweils eine der in Tabelle 7 dargestellten Kombinationen der 0-1-Variablen zusammengefaßt.

Tabelle 8

Optimale Produktions- und Liefermengen (in to/Jahr) für die Kombination der 0-1 Variablen Nr. 13 (vgl. Tabelle 7) (Zielfunktionswert in 100 DM/Jahr)

Zielfunktionswert: GK = 8735							
Produktions-produkte i	Absatzprodukte a	Werk 1 Prod.mengen	Werk-Werk Transp.[1]	Liefer-mengen[1]	Werk 2 Prod.mengen	Werk-Werk Transp.[1]	Liefer-mengen[1]
1	1			422	180		265
2		422			85		
3	2	644		644	407		407
4							
5	3	171		297	166		166
6		126					
7	4	477		477	234		234
8	5	792	-70	722		70	70
9	6	1420		2540	1850		1850
10		1120					
11	7		-17	163		17	17
12		180					
13							
14	8	124	-13	134		13	13
15		23					
Gesamt		5499	-100	5399	2922	100	3022
Slacks: Lager		571			1833		
Mischer		6203			229		
Fert.fläche		77					

[1] Für den Werk zu Werk Transport und die Werkslieferprogramme sind die Produktionsprodukte i zu Absatzprodukten a zusammengefaßt (i = 1,....,15; a = 1,....,8)

Tabelle 9

Optimale Produktions- und Liefermengen (in to/Jahr) für die Kombination der 0-1 Variablen Nr. 16 (vgl. Tabelle 7) (Zielfunktionswert in 100 DM/Jahr)

Zielfunktionswert: GK = 8745							
Produktionsprodukte i	Absatzprodukte a	Werk 1 Prod.mengen	Werk-Werk Transp.[1]	Werk 1 Liefermengen[1]	Werk 2 Prod.mengen	Werk-Werk Transp.[1]	Werk 2 Liefermengen
1	1	496		496	180		191
2					11		
3	2	121		751	300		300
4		630					
5	3	297		297	166		166
6							
7	4	446		446	264		264
8	5	517		517	275		275
9	6	1420		2694	1696		1696
10		1274					
11	7	180	-29	151		29	29
12							
13	8	146	-13	133		13	13
14							
15							
Gesamt		5527	-42	5485	2892	42	2934
Slacks: Lager		549			1855		
Mischer		6140			258		
Fert.fläche		28					

[1] Für den Werk zu Werk Transport und die Werkslieferprogramme sind die Produktionsprodukte i zu Absatzprodukten a zusammengefaßt (i = 1,....,15; a = 1,....,8)

Die kostengünstigen Alternativen der Tabelle 7 sind die Alternativen 13, 17, 18, 16. Die Alternativen 13, 17, 18 haben gemeinsam, daß – durch die Fixierung der in der Tabelle 7 mit der Nr. 8 bezeichneten 0-1 Variablen auf den Wert "0" – die Produktion der Rohrart 8 (i=8) auf das Werk 1 konzentriert wird. Da die Rohrarten 7 und 8 häufig zusammen bestellt werden, treten bei diesen Alternativen Kosten für einen notwendigen Werk-zu-Werk-Transport bzw. für die Getrenntlieferung von beiden Werken auf, die im Grobmodell nicht erfaßt sind. Von den ähnlichen Alternativen 13, 17, 18 der Tabelle 7 wird daher nur Alternative 13 zur Optimierung mit Hilfe des ursprünglichen Modells ausgewählt. Die Alternative 16 der Tabelle 7 sieht dagegen die Konzentration der Produktion solcher Rohrarten auf ein Werk nicht vor, die zusammen mit anderen Rohrarten bestellt werden. Sie unterscheidet sich damit grundsätzlicher von der Alternative 13 als die Alternativen 17 und 18. Sie wird ebenfalls genauer untersucht.

Anzumerken ist zu den Tabellen 8 und 9:

1. Beide Alternativen führen zu etwa dem gleichen Zielfunktionswert.
2. Alle Produkte, deren Produktion nicht als Folge der gewählten Kombination der 0-1 Variablen auf ein Werk konzentriert werden muß, werden in beiden Werken gefertigt.
3. Für die nur in Werk 1 gefertigten Rohrarten ist der Transport nach Werk 2 in beschränktem Umfang vorgesehen.
4. Das Lager und die Mischerkapazität sind keine aktiven Restriktionen. Die Fertigungsfläche ist in Werk 2 Engpaß; das Werk 2 ist also das Engpaßwerk.

Zu Punkt 5, der Lieferpolitik, sind Zahlenangaben wenig ergiebig und anschaulich. Es kommt vielmehr darauf an, zu zeigen, welche Absatzbezirke mit welchen Produkten bei gegebenem Produktions- und Lieferprogramm der Werke

beliefert werden sollten. Zweckmäßig ist die Darstellung dann, wenn sie in ähnlicher Form zur Basis eines Verteilerschlüssels gemacht werden könnte, nach dem die eingehenden Aufträge bzw. Teilaufträge an die beiden Werke zur Auslieferung verteilt werden.[1)] Entsprechende Darstellungen sind in den Tabellen 10 und 11 versucht.

Anmerkungen zu beiden Tabellen:

1. Da bei beiden Alternativen alle Absatzprodukte a auch in Werk 1 produziert werden und die Produktion in Werk 1 als Folge standortbedingter Lohnkostenunterschiede kostengünstiger ist, werden Aufträge, deren Transportkosten wegen geringer Auftragswerte von Kunden zu tragen sind, grundsätzlich von Werk 1 geliefert (l = 1,...,8).

2. Von der vorgesehenen Möglichkeit, Aufträge je nach den vom Auftragsgewicht abhängigen Transportkosten pro Mengeneinheit von verschiedenen Werken zu liefern, wird für die kritischen Absatzbezirke 2 bis 6 Gebrauch gemacht. (vgl. z.B. in beiden Tabellen die

---

[1)] Fußnoten zu den Tabellen 10, 11, 12 (S.115,116,118):

1) Es bedeuten:
   - x die Lieferung des Auftrages ist von Werk 1 vorzunehmen
   - o die Lieferung des Auftrages ist von Werk 2 vorzunehmen
   - v die Lieferung des Auftrages und von Teilaufträgen, die die Rohrart enthalten, ist von Werk 1 vorzunehmen
   - w die Lieferung des Auftrages und von Teilaufträgen, die die Rohrart enthalten, ist von Werk 2 vorzunehmen

2) l = 1,...,8 sind Aufträge, deren Transportkosten wegen geringen Auftragwertes vom Kunden zu tragen sind

3) Die Klasse ist nur besetzt, wenn Aufträge über mehr als eine Rohrart lauten und die Lieferung von Teilaufträgen vorzunehmen ist. Ansonsten fallen Aufträge in dieser Gewichtsklasse unter die Aufträge, deren Transportkosten wegen geringen Auftragwertes vom Kunden zu tragen sind.

fertableau zur Alternative: 13 (Tabelle 7)[1]

.Nr.	Bei Bestellung von										
iefer-	Absatz-	Bestellgewicht		Lieferung							
dukte	produkte	von.... kg bis		in Bezirk							
1	a	unter.... kg		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	200[2]	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	2	0	200	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	3	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	4	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	5	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	6	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	7	0	50	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	8	0	1000	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9	1	0	200[3]									
10	"	200	400	o	o	o	o	o	x	x	x	x
11	"	400	800	x	o	o	o	o	x	x	x	x
12	"	800	1600	x	o	o	o	o	x	x	x	x
13	"	1600	3200	x	o	x	o	x	x	x	x	x
14	2	0	200[3]									
15	"	200	400	o	o	o	o	o	x	x	x	x
16	"	400	800	o	o	o	o	o	x	x	x	x
17	"	800	1600	o	o	o	o	o	x	x	x	x
18	"	1600	3200	o	o	o	o	o	x	x	x	x
19	1 u.2	200	400	o	o	o	o	o	x	x	x	x
20	"	400	800	o	o	o	o	o	x	x	x	x
21	"	800	1600	x	o	o	o	o	x	x	x	x
22	"	1600	3200	x	o	o	o	x	x	x	x	x
23	"	3200	6400	x	o	o	o	x	x	x	x	x
24	3	0	1200[3]									
25	"	1200	2400	o	o	o	o	o	x	x	x	x
26	"	2400	4800	o	o	o	o	o	x	x	x	x
27	4	0	1200[3]									
28	"	1200	2400	o	o	o	o	o	x	x	x	x
29	"	2400	4800	o	o	o	o	o	x	x	x	x
30	5	0	1200[3]									
31	"	1200	2400	x	x	x	o	x	x	x	x	x
32	"	2400	4800	x	x	x	o	x	x	x	x	x
33	"	4800	9600	x	x	x	x	x	x	x	x	x
34	3 u.4	1200	2400	o	o	o	o	o	x	x	x	x
35	"	2400	4800	o	o	o	o	o	x	x	x	x
36	"	4800	9600	o	o	o	o	o	x	x	x	x
37	4 u.5	1200	2400	x	o	x	o	x	x	x	x	x
38	"	2400	4800	x	o	x	o	x	x	x	x	x
39	"	4800	9600	x	x	x	o	x	x	x	x	x
40	6	1200	4800	o	o	o	o	o	o	x	x	x
41	"	4800	9600	o	o	o	o	o	o	x	x	x
42	"	9600	19200	o	o	o	o	o	o	x	x	x
43	7	50	300	x	x	x	o	x	x	x	x	x
44	"	300	1000	x	x	x	o	x	x	x	x	x
45	"	1000	3000	x	x	x	x	x	x	x	x	x
46	8	1000	2000	x	o	x	o	o	x	x	x	x
47	"	2000	4000	x	x	x	o	o	x	x	x	x

noten siehe Seite 114

Liefertableau zur Alternative: 16 (Tabelle 7)[1]

lfd.Nr. d.Liefer-produkte	Bei Bestellung von Absatz-produkte	Bestellgewicht von.... kg bis unter.... kg		Lieferung in Bezirk 1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	200[2]	x	x	x	x	x	x	x	x
2	2	0	200	x	x	x	x	x	x	x	x
3	3	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x
4	4	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x
5	5	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x
6	6	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x
7	7	0	50	x	x	x	x	x	x	x	x
8	8	0	1000	x	x	x	x	x	x	x	x
9	1	0	200[3]								
10	"	200	400	x	o	o	o	o	x	x	x
11	"	400	800	x	o	o	o	o	x	x	x
12	"	800	1600	x	o	o	o	x	x	x	x
13	"	1600	3200	x	x	x	o	x	x	x	x
14	2	0	200[3]								
15	"	200	400								
16	"	400	800	o	o	o	o	o	x	x	x
17	"	800	1600	x	o	o	o	o	x	x	x
18	"	1600	3200	x	o	o	o	x	x	x	x
19	1 u.2	200	400	x	x	x	o	x	x	x	x
20	"	400	800	x	o	o	o	x	x	x	x
21	"	800	1600	x	o	o	o	x	x	x	x
22	"	1600	3200	x	o	x	o	x	x	x	x
23	"	3200	6400	x	o	x	o	x	x	x	x
24	3	0	1200[3]	x	x	x	o	x	x	x	x
25	"	1200	2400								
26	"	2400	4800	o	o	o	o	o	x	x	x
27	4	0	1200[3]	o	o	o	o	o	x	x	x
28	"	1200	2400								
29	"	2400	4800	o	o	o	o	o	x	x	x
30	5	0	1200[3]	o	o	o	o	o	x	x	x
31	"	1200	2400								
32	"	2400	4800	o	o	o	o	o	x	x	x
33	"	4800	9600	o	o	o	o	o	x	x	x
34	3 u.4	1200	2400	o	o	o	o	o	x	x	x
35	"	2400	4800	o	o	o	o	o	x	x	x
36	"	4800	9600	o	o	o	o	o	x	x	x
37	4 u.5	1200	2400	o	o	o	o	o	x	x	x
38	"	2400	4800	x	o	o	o	o	x	x	x
39	"	4800	9600	o	o	o	o	o	x	x	x
40	6	1200	4800	o	o	o	o	o	o	x	x
41	"	4800	9600	o	o	o	o	o	x	x	x
42	"	9600	19200	o	o	o	o	o	x	x	x
43	7	50	300	x	o	x	o	x	x	x	x
44	"	300	1000	x	x	x	o	x	x	x	x
45	"	1000	3000	x	x	x	x	x	x	x	x
46	8	1000	2000	x	o	x	o	o	x	x	x
47	"	2000	4000	x	x	x	o	o	x	x	x

Fußnoten siehe Seite 114

Spalten 2 - 5 in den Zeilen 11 - 13, 20 - 23, 43 - 45). Dabei ist festzustellen, daß in die betreffenden Bezirke vom Engpaß Werk Werk 2 (Lieferung von Werk 2 ist mit o gekennzeichnet) regelmäßig der — bezogen auf die Rohrgewichtseinheit — teurere Transport kleiner Auftragsgewichte vorgenommen wird.

3. In beiden Alternativen werden Aufträge über mehrere Rohrarten grundsätzlich in einer Sendung verschickt. (Die Symbole v und w kommen daher in beiden Tabellen nicht vor.) Diese Information ist nicht trivial. Die analoge Auswertung der Testalternative 2 (vgl. Tabelle 2) in Tabelle 12 zeigt, daß das Lieferoptimum für die dort unterstellte Wertkombination der 0-1 Variablen sehr wohl Getrenntlieferung von beiden Werken vorsieht. (vgl. die Spalten 5 - 9, Zeile 9 - 23 der Tabelle 12).

65 Sensitivitätsanalyse

Die mit Hilfe der Zielfunktion vorgenommenen Bewertungen der Alternativen sind Funktionen der prognostizierten, unsicheren Modellparameter. Es muß gefragt werden, ob und in welcher Weise sich die Lösungen ändern, wenn die tatsächlich eintretenden, externen Daten von den prognostizierten Parameterwerten abweichen. Die Durchführung entsprechender Untersuchungen bzw. der Ausdruck von hierzu nützlichen Informationen, die aus einer Ausgangslösung gezogen werden können, ist bei den komfortableren Programmen zur Lösung linearer Modelle vorgesehen. Möglichkeiten sind[1]:

1. Ausdruck der marginalen Kosten bzw. Schattenpreise[2]

---

[1] Vgl. Informationen für die Landwirtschaftsberatung, a.a.O, S.31 ff., S.40 ff., S.45 ff.

[2] Eine ausführliche Interpretation der Bedeutung der Angaben, sowie erläuterte Ergebnisausdrucke für die Programme Allegro Code (DCD-3600) und MPS (IBM System 360) finden sich bei Driebeek, S.92 ff.

Liefertableau zur Alternative Test 2 (vgl. Tabelle 2)[1]

lfd.Nr. d.Liefer-produkte	Bei Bestellung von Absatz-produkte	Bestellgewicht von.... kg bis unter.... kg		Lieferung in Bezirk							
I	a			1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	200[2]	x	x	x	x	x	x	x	x
2	2	0	200	o	o	o	o	o	o	o	o
3	3	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x
4	4	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x
5	5	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x
6	6	0	1200	x	x	x	x	x	x	x	x
7	7	0	50	x	x	x	x	x	x	x	x
8	8	0	1000	x	x	x	x	x	x	x	x
9	1	0	200[3]								
10	"	200	400	x	o	x	o	x	x	v	x
11	"	400	800	x	x	x	x	x	x	v	x
12	"	800	1600	x	x	x	x	x	x	v	v
13	"	1600	3200	x	x	x	x	v	v	v	v
14	2	0	200[3]								
15	"	200	400	o	o	o	o	o	o	w	o
16	"	400	800	o	o	o	o	o	o	w	o
17	"	800	1600	o	o	o	o	o	o	w	w
18	"	1600	3200	o	o	o	o	w	w	w	w
19	1 u.2	200	400	o	o	o	o	o	o	x	x
20	"	400	800	o	o	o	o	o	o		x
21	"	800	1600	o	o	o	o	o	o		x
22	"	1600	3200	o	o	o	o	o	o		
23	"	3200	6400	o	o	o	o				
24	3	0	1200[3]								
25	"	1200	2400	x	o	o	o	x	x	x	x
26	"	2400	4800	x	o	o	o	x	x	x	x
27	4	0	1200[3]								
28	"	1200	2400	o	o	o	o	x	x	x	x
29	"	2400	4800	x	o	o	o	x	x	x	x
30	5	0	1200[3]								
31	"	1200	2400	x	o	o	o	x	x	x	x
32	"	2400	4800	x	o	o	o	x	x	x	x
33	"	4800	9600	x	o	x	o	x	x	x	x
34	3 u.4	1200	2400	o	o	o	o	x	x	x	x
35	"	2400	4800	x	o	o	o	x	x	x	x
36	"	4800	9600	x	o	x	o	x	x	x	x
37	4 u.5	1200	2400	o	o	o	o	x	x	x	x
38	"	2400	4800	x	o	o	o	x	x	x	x
39	"	4800	9600	x	o	x	o	x	x	x	x
40	6	1200	4800	x	o	x	o	x	x	x	x
41	"	4800	9600	x	x	x	x	x	x	x	x
42	"	9600	19200	x	x	x	x	x	x	x	x
43	7	50	300	x	o	x	o	x	x	x	x
44	"	300	1000	x	x	x	o	x	x	x	x
45	"	1000	3000	x	x	x	x	x	x	x	x
46	8	1000	2000	x	o	x	o	o	x	x	x
47	"	2000	4000	x	x	x	o	o	x	x	x

Fußnoten siehe Seite 114

Der Nutzen dieser Angaben ist jedoch begrenzt, weil es sich um marginal gültige Werte handelt, über deren Gültigkeitsbereich keine Angabe gemacht wird.

2. Berechnung und Ausdruck der Bereiche für die ceteris paribus

   a) ein Kostenkoeffizient variieren kann, ohne daß sich die optimale Lösung ändert,

   b) eine "rechte Seite" geändert werden kann, ohne daß die optimale Lösung unzulässig wird.

3. Berechnung und Ausdruck der Lösungen für schrittweise Änderung von Parameterwerten der Zielfunktion, der rechten Seiten und der Matrixelemente.

Für gemischt-ganzzahlige Probleme ist selbst die Theorie zu entsprechenden Möglichkeiten noch wenig entwickelt.[1] Der sich anbietende Ausweg, näherungsweise entsprechende Untersuchungen für das dem gemischt-ganzzahligen Modell entsprechende lineare Modell durchzuführen, ist problematisch, da gerade als Folge der Ganzzahligkeit Kostensprünge auftreten, die im linearen Modell nicht enthalten sind.

Es bleibt der bereits beschrittene Weg, für ausgewählte Wertekombinationen der 0-1 Variablen den linearen Modellteil zu optimieren und anzugeben, wie sich der Zielfunktionswert und gegebenenfalls die Produktionsmengen der Werke als Folge von Parametervariationen wichtiger Parametergruppen unter der Voraussetzung der gegebenen Wertekombination der 0-1 Variablen ändern. Weiter kann angegeben werden, für welchen Wertebereich einer Parame-

---

[1] Ansätze hierzu, sowie Anregungen und Hinweise auf weitere Literatur zur Sensitivitätsanalyse bei gemischt-ganzzahligen Problemen finden sich bei NOLTEMEIER,H., Sensitivitätsanalyse bei diskreten, linearen Optimierungsproblemen, Lecture Notes in Operations Research and Mathematical Systems, Berlin, 1970

tergruppe eine bestimmte Wertekombination der O-1 Variablen ein besseres Ergebnis liefert als eine andere, der untersuchten Wertekombinationen. Die anfallenden Rechenzeiten erlauben eine solche Untersuchung nur an Hand des Grobmodells und für eine weit geringere Zahl alternativer Wertekombinationen der O-1 Variablen als der im Abschnitt 63 untersuchten Zahl (vgl. Tabelle 6 und 7) durchzuführen. Bei der einzelnen Parametrisierung werden nicht einzelne Parameter, sondern zusammengehörige Gruppen von Parametern variiert. Auswahlkriterien für die zu untersuchenden Parametervariationen sind insbesondere:

1. Große Prognoseunsicherheiten (z.B. bei der Prognose der Nachfragemengen) bzw. Bewertungswillkür (z.B. bei der Bestimmung der Abschreibungssätze).
2. Besonderer Einfluß auf die ermittelte Lösung. Unter den gemachten Einschränkungen können Angaben über Dualvariable der bereits vorhandenen Lösungen als Anhalt dienen.

Für die folgenden Parametergruppen werden Variationen um die in den vorigen Abschnitten benutzten Werte untersucht:

1. Die Transportkostenkoeffizienten
2. Die Maschinenfixkosten variabler Faktoren (das sind die Koeffizienten der O-1 Variablen)
3. Die Nachfragemengen
   a) Erhöhung der Kundennachfrage bei entsprechender Variation der Kapazität des Werkes 1
   b) Erhöhung der Kundennachfrage bei entsprechender Variation der Kapazität des Werkes 2
   c) Verringerung der Kundennachfrage

Wenn wir uns im folgenden auf die Untersuchung von vier alternativen Wertekombinationen der O-1 Variablen beschränken, so sind die Vorstellungen über die Sensitivität der Lösungen in solchen Parameterbereichen besonders schlecht, in denen keine dieser vier Alternativengruppen

gute Alternativen enthält. Zweckmäßig ist es daher, neben den beiden im vorhergehenden Abschnitt 64 im Detail untersuchten Kombinationen der 0-1 Variablen 13 und 16 (vgl. Tabelle 8 - 11), die zum Grobmodelltest benutzten, extrem gegensätzlichen Alternativen 1 und 4 der Tabelle 2 zu untersuchen. Bei Alternative 1 der Tabelle 2 ist die Produktion jeder Rohrart auf nur ein Werk konzentriert, bei Alternative 4 ist die Produktion der Rohrart in beiden Werken vorgesehen. Wenn sich die Zielfunktionssteigungen dieser beiden Alternativen als Funktion gleicher Parameteränderungen sehr verschieden entwickeln, so kann daraus — selbst wenn beide Alternativen im untersuchten Variationsbereich nicht kostengünstig werden — geschlossen werden, daß es zwischen diesen beiden Extremen liegende Alternativen geben kann, die in entsprechenden Parameterbereichen kostengünstiger als die Alternativen 13 und 16 sind. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen a, b, und c festgehalten.

In Abbildung a. ist eine Änderung der Transportkostenkoeffizienten um ±10% des Ausgangswertes unterstellt. Die beiden extremen Alternativen (bezeichnet als Test 1 und Test 4) zeigen annähernd gleiche Steigung. Das läßt darauf schließen, daß es kaum Alternativen geben wird, die im untersuchten Bereich die beiden unteren Kurven 16 und 13 schneiden, d.h. in diesem Parameterbereich kostengünstiger als die beiden günstigen Alternativen 13 und 16 sind.

Die in Abbildung b. gewählte größere Variationsbreite von ±40% des Ausgangswertes für die Koeffizienten der 0-1 Variablen ist zweckmäßig, weil die Wahl der Abschreibungsdauer und damit der Abschreibungshöhe weitgehend subjektiv ist. Für die Alternativen Test 1 und Test 4 ist eine deutlichere Steigungsabweichung der Zielfunktion als unter a. festzustellen. Das läßt darauf schließen, daß die günstigen Alternativen 13 und 16 geringere Stabilität aufweisen. Im Bereich kleinerer Abschreibungssätze werden solche Alternativen zunehmend

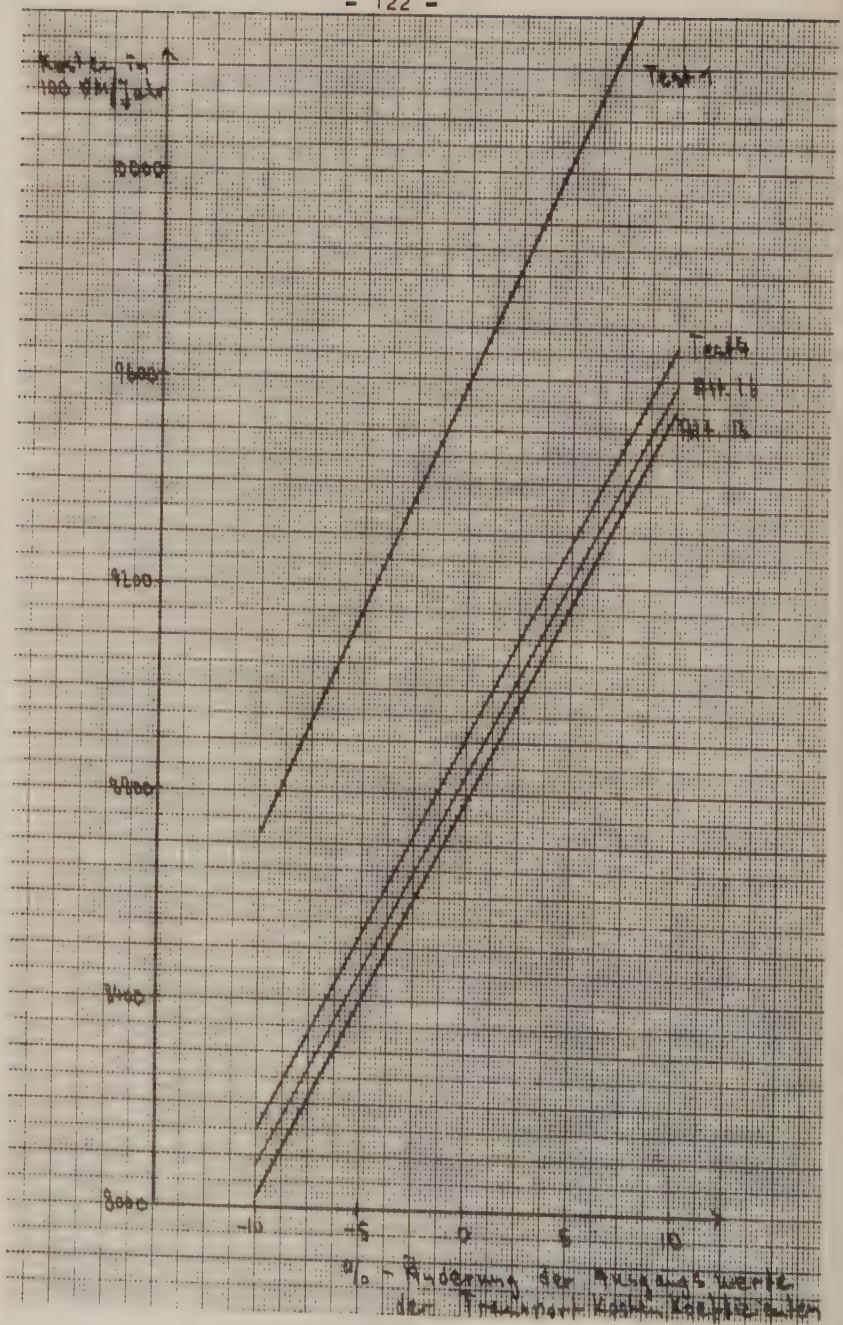

Abbildung a

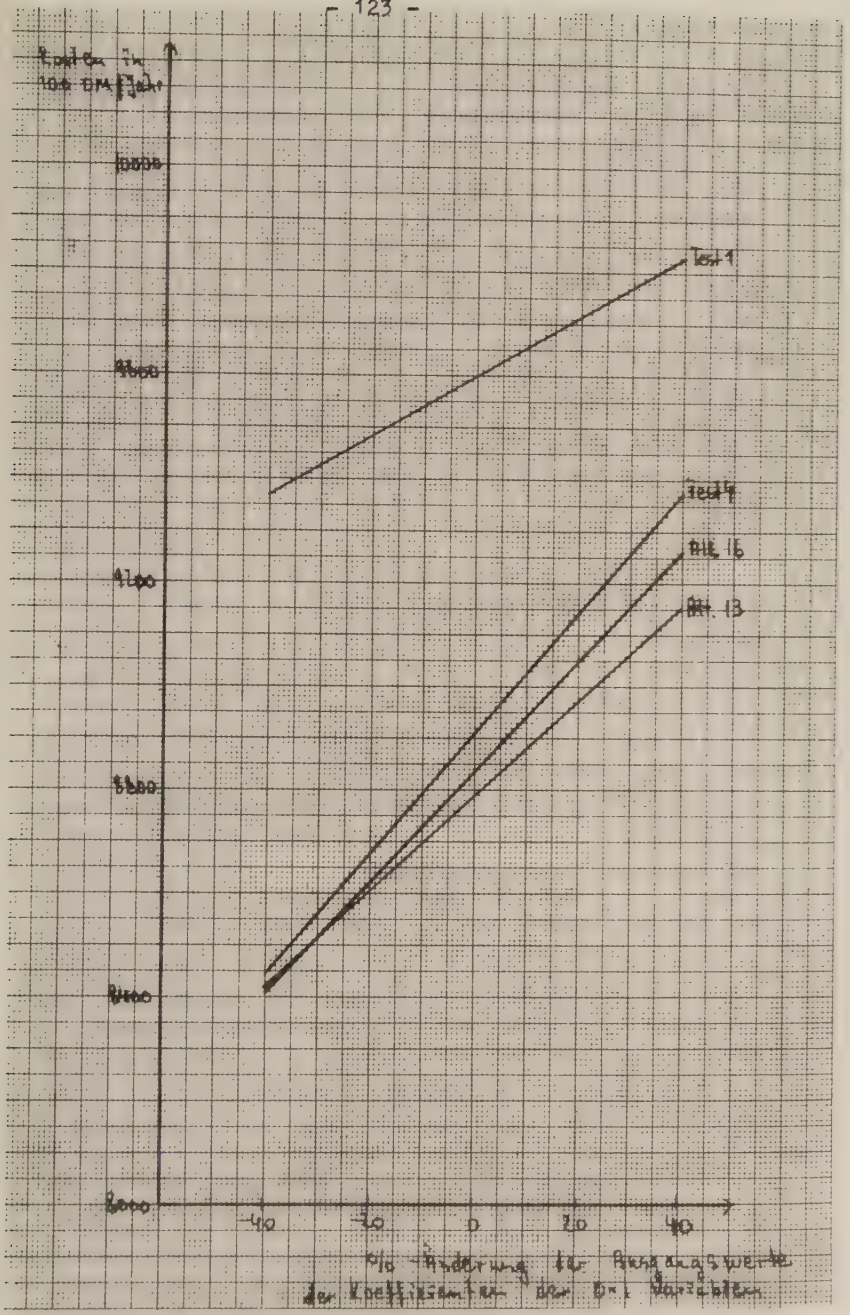

Abbildung b

günstiger, die die Produktion der meisten Rohrarten in beiden Werken vorsehen. (z.B. Alternative Test 4). Im Bereich größerer Abschreibungssätze scheinen die ursprünglich günstigen Lösungen 13 und 16 stabiler zu sein. Die Verschlechterung der Transportkostensituation bei Konzentration der Produktion der meisten Rohrarten auf ein Werk (die bereits aus Tabelle 6 ersehen werden kann) überkompensiert die Kosteneinsparungen im Bereich der sprungfixen Kosten variabler Maschinenkapazitäten.

Die in Abbildung c. als Funktion von Variationen der Nachfragemengen dargestellten Kostenkurven verlaufen annähernd parallel. Das bedeutet, daß die untersuchten Lösungen im Hinblick auf die darin enthaltenen Kombinationen der 0-1 Variablen im untersuchten Variationsbereich weitgehend stabil sind. Im Bereich von Nachfrageerhöhungen müssen Werkskapazitäten vergrößert werden. Eine Erhöhung der Kapazität in Werk 1 ist als ausgezeichnete Linie, die alternative Erhöhung der Kapazität von Werk 2 als gestrichelte Linie gekennzeichnet. Wie zu erwarten, wäre es jeweils günstiger, die Kapazität des Werkes 2, das bereits bei der Interpretation der Tabellen 8 und 9 als Engpaßwerk gekennzeichnet wurde, zu erhöhen. Die Alternative Test 1 ist bei Erhöhung der Kapazität des Werkes 2 nicht durchführbar.

Aus den Abbildungen a. bis c. kann nicht ersehen werden, ob und in welchem Maße sich die optimalen Produktionsmengen der Werke für eine gegebene Kombination der 0-1 Variablen als Folge der Parametervariationen ändern. Für den untersuchten Variationsbereich der Kostenparameter bleiben die optimalen Produktionsmengen der Werke (für gegebene Kombinationen der 0-1 Variablen!) unverändert.

Bei Nachfragemengenvariationen müssen sich die Produktionsmengen der Werke notwendig ändern. Dabei ist festzustellen:

1. Ein gewisses Beharren der Lösung auf bestimmten Produktionsanteilen der Werke ist durch die stückweise

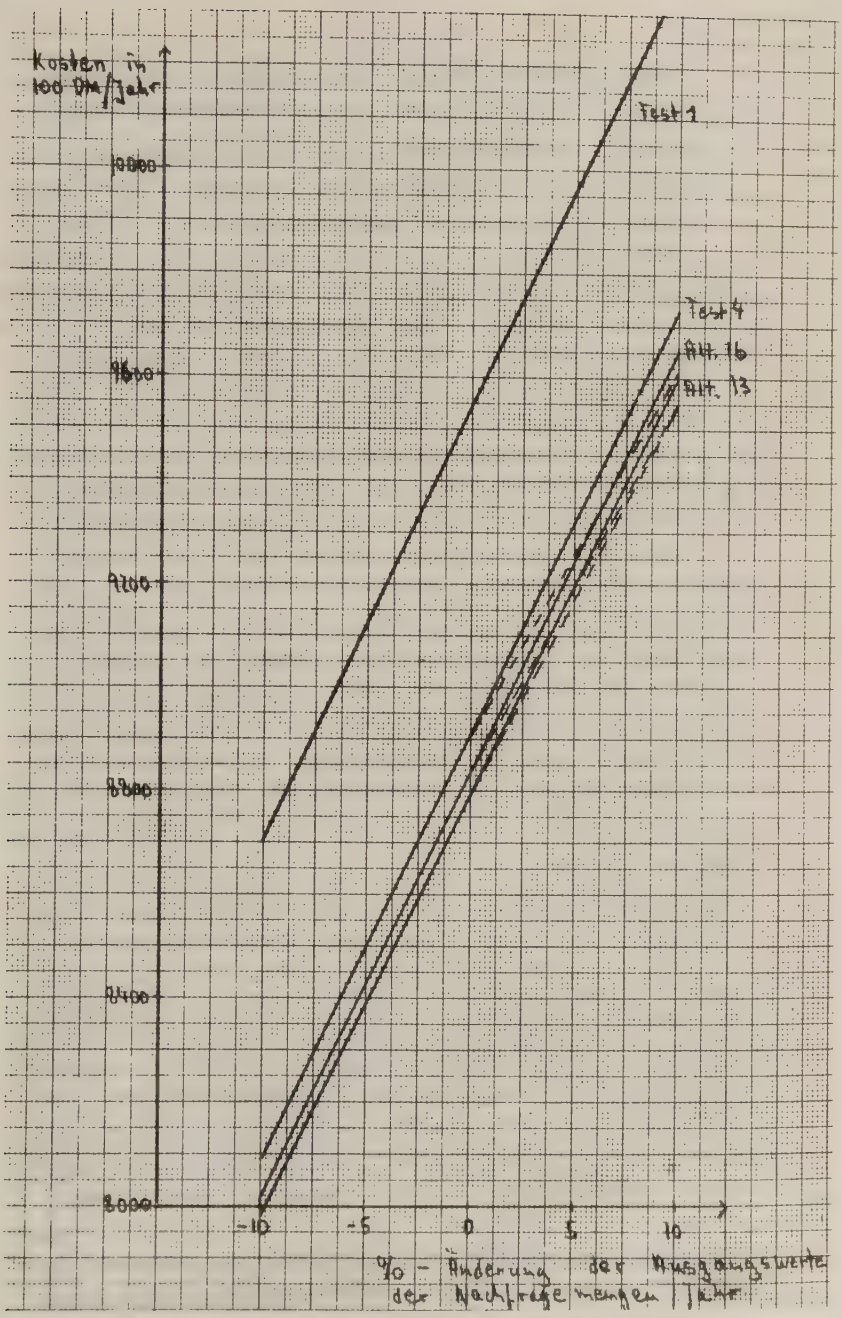
Kosten in
100 DM/Jahr
Test 1
Test 4
Alt. 16
Alt. 13
-10
-5
0
5
10
% - Änderung der Nachfragemengen
der Ausgangswerte

Abbildung c

linearisierten Transportkostenfunktionen zu erklären. Die Lösungen sind an den Eckpunkten besonders stabil.

2. Bei einer Nachfrageerhöhung mit Kapazitätserweiterung in Werk 1 sind für die beiden günstigen Alternativen 13 und 16 die Produktionsmengenanteile der Absatzprodukte a = 1,2 in Werk 1 zu erhöhen. Die Produktionsmengenanteile der übrigen Absatzprodukte sind im untersuchten Parameterbereich konstant zu halten. Bei einer Kapazitätserweiterung in Werk 2 ist nur der Produktionsmengenanteil des Absatzproduktes a = 1 in Werk 2 zu erhöhen. Bei einem Nachfragerückgang ist der Anteil des vorherigen Engpaßwerkes Werk 2 an der Gesamtproduktionsmenge zu erhöhen. Die Absatzprodukte, für die der in Werk 2 zu produzierende Anteil an der Gesamtproduktionsmenge zu erhöhen ist, sind Produkt a = 1, 7, 8.

Im Rahmen der relativ klein gewählten Variationsbereiche der Parameterisierung sind die Lösungen weitgehend stabil. Natürlich wären weitere Untersuchungen über das Verhalten der Lösungen möglich. Ein möglicher Schritt wäre – wie bereits auf S.119 angegeben – die Grenzen der Parameterbereiche berechnen zu lassen, für die eine Alternative optimal bzw. zulässig bleibt. Hierauf wird aber verzichtet.

66 Beurteilung der Ergebnisse der Fallstudie

Um die Ergebnisse der Fallstudie zu beurteilen, ist es notwendig, sich den beschränkten Geltungsbereich des Modells deutlich zu machen. Erst aus ihm ergibt sich, für welche Entscheidungssituation die Ergebnisse eine Entscheidungshilfe sein können. Im Abschnitt 42 wurde entwickelt, ob und für welche Fragestellung ein statisches Modell bei der Annahme einer gegebenen Nachfrage und eines – mit daraus resultierend – Kostenkriteriums im gegebenen Fall nützlich sein kann. Es wurde argumentiert, daß ein statisches Modell anwendbar ist, um auf der Grundlage einer jährlich im Saisontief vorzunehmen-

den Absatzschätzung für das kommende Jahr

1. eine günstige Produktionsverteilung auf die beiden vorhandenen Werke zu ermitteln, wobei gleichzeitig
2. ein günstiger Lieferplan für den Werk-zu-Werk- und Werk-zu-Kunden-Transport bestimmt wird.

Die Ergebnisse sind daher nicht ohne Modifikationen geeignet, um langfristig die Existenz eines bestimmten Werkes zu rechtfertigen bzw. eine langfristige Kapazitätsentwicklung zu planen.

Zunächst zeigen die Ergebnisse der Tabelle 7, daß eine ganze Anzahl von durch Kombinationen von 0-1 Variablen gekennzeichneten Werksausstattungen gute Lösungen ergeben. Zwar stammt der Tabelleninhalt aus der Optimierung des Grobmodells, die Tabelle 2 und die Detailuntersuchungen der Alternativen 13 und 16 der Tabelle 7 weisen jedoch auf eine gute Übereinstimmung beider Modelle hin. Insbesondere zeigen die Tabellen 6 und 7, daß gute Lösungen für Alternativen zu erwarten sind, bei denen grundsätzlich alle Rohrarten in Werk 1 gefertigt werden, wobei in Werk 2 auf die Produktion einer nahezu beliebigen Kombination der Absatzprodukte $a = 1, 5, 7, 8$ verzichtet werden kann.

Bei der Durchsicht der Ergebnisse muß berücksichtigt werden, daß sie jeweils bereits das Ergebnis der Optimierung des linearen Modellteils sind. Sie geben daher nur bedingt Aufschluß darüber, wie gut oder schlecht eine rein intuitiv gefundene Produktions- und Lieferalternative ausfallen könnte. Zwei gute Lösungen des Grobmodells wurden mit Hilfe des ursprünglichen Modells genauer spezifiziert. Aus den Ergebnissen wurden die Tabellen 8 - 11 gezogen, die in konzentrierter und gegenüber dem Rechnerausdruck übersichtlicherer Form die wesentlichen Aspekte dieser Alternativen darstellen.

Die beim gegebenen Modellumfang notwendigerweise relativ globalen Sensitivitätsanalysen zeigen im wesentlichen eine gute Stabilität der beiden vorzuschlagenden Alternativen.

Hinzuweisen ist auf die Notwendigkeit zur Kontrolle der Realisierung einer einmal gewählten Alternative. Wenn die Alternative nicht durchgesetzt werden kann, dann können die erwähnten Kosteneinsparungen selbst dann nicht eintreten, wenn die im Modell enthaltenen Beziehungen und Daten exakt zuträfen.

7. ZUSAMMENFASSUNG, INSBESONDERE DER WICHTIGEREN ERGEBNISSE

Die Arbeit behandelt ein Produktionsverteilungsproblem anhand eines konkreten Falles.

Im ersten Abschnitt der Arbeit wird zunächst vom Einzelfall abstrahiert und allgemein der Anwendungsbereich von Modellen mit der in der Arbeit entwickelten Struktur abgegrenzt. Betrachtet wird ein Unternehmen mit Sortenfertigung, das über mehrere Werke verfügt. Die Produktionsprogramme (und die Kapazität) der einzelnen Werke sind in gewissen Grenzen variabel, so daß gefragt werden kann, wie die Produktion bei gegebener Nachfrage nach mehreren Produkten (Sorten), die möglicherweise auf ganz verschiedenen Märkten angeboten werden, auf die Werke verteilt werden sollte.

Der zweite Abschnitt befaßt sich im wesentlichen mit der Beschreibung und mathematischen Formulierung der Struktur von Sachverhalten, die (unabhängig vom Einzelfall) entscheidungsabhängig sein können. Dabei wird regelmäßig ein Kostenkriterium unterstellt. Hierbei liefert die Literatur – insbesondere auch als Folge der relativ engen Problemstellung – nur wenige Beiträge. Auf der einen Seite finden sich verbale Beschreibungen der Probleme, die nicht bis zu einer Modellierung vorangetrieben werden. Zum anderen finden sich Aufsätze in der Literatur zur Unternehmensforschung, die sich nur knapp mit der Entwicklung einer bestimmten Problemstruktur auseinandersetzen, im Übrigen aber ihren Schwerpunkt auf die Entwicklung neuer oder verbesserter Algorithmen legen.

Zunächst wurden entscheidungsabhängige Distributionskosten der Fertigprodukte betrachtet. Die Kosten pro Gewichtseinheit hängen in starkem Maße von den Gewichten der Einzelsendungen ab. Bereits im Einproduktfall werden die Ungenauigkeiten des herkömmlichen Einprodukttransportmodells beträchtlich, wenn die Bestellgewichte und damit die realisierbaren Sendungsgewichte weit streuen. Im Mehrproduktfall beeinflussen zudem die Werksproduktionsprogramme die

realisierbaren Sendungsgewichte immer dann, wenn Kunden mehrere Absatzprodukte in einem Auftrag bestellen. SHYCON und MAFFEI[1] sehen hierin einen wesentlichen Grund dafür, Distributionssysteme zu simulieren. Simulation bedeutet aber, daß günstige Alternativen weitgehend durch Probieren gefunden werden müssen.

Ausgangspunkt der Überlegungen zu einem Ansatz, der optimiert werden kann, ist, daß die Optimierung linearer Programme mit mehreren tausend Variablen und Restriktionen möglich und von den anfallenden Rechenzeiten her gesehen auch vertretbar ist. Das Ziel sollte daher sein – unter Nutzung dieses großen Potentials – Liefervariable zu definieren, für die die Annahme zutrifft, daß die Distributionskosten (in Geldeinheiten/Planungsperiode) lineare Funktionen der versandten Mengen (in Gewichtseinheiten/Planungsperiode) sind. Hierzu ist notwendig die Absatzstruktur nicht nur im Hinblick auf Absatzprodukte und Absatzpunkte sondern detaillierter im Hinblick auf Auftragszusammensetzungen von Aufträgen über mehrere Produkte und Bestellmengen zu erfassen. Weiterhin muß bedacht werden, daß für Aufträge über mehrere Produkte die alternative Lieferung entweder des Gesamtauftrags von einem Lieferpunkt oder von Teilaufträgen von mehreren Lieferpunkten in Frage kommt. Die anfallenden Distributionskosten sind in beiden Fällen verschieden hoch. Es zeigt sich, daß die Formulierung eines im Prinzip beliebig exakten Modells möglich ist. Praktisch wird man aber versuchen, die wesentliche Struktur des Absatzes vereinfacht zu erfassen. Die Bedeutung der einzelnen, entscheidungsabhängigen Sachverhalte läßt sich aber nur

---

[1] vgl. SHYCON,H.N., MAFFEI,R.B., a.a.O., S.65 ff. und insbesondere die Kritik dieser Autoren an dem bereits zitierten Aufsatz von KUEHN, HAMBURGER: SHYCON,H.N., MAFFEI,R.B., Remarks on the Kuehn-Hamburger Paper, in: Management Science, Vol.9., No.4, 1963, S.667 f.

aufgrund von Daten ermitteln. Es ist notwendig und sehr aufwendig, die Absatzstruktur im Hinblick auf entscheidungsabhängige Gesichtspunkte zunächst detailliert (z.B. durch eine Stichprobenerhebung der Einzelauftragsabrechnungen der Vergangenheit) zu erfassen, um dann durch Vereinfachung Absatz- und Lieferkategorien sinnvoll zu definieren. (Eine entsprechende Strukturierung wurde für den in späteren Abschnitten behandelten Fall durchgeführt.)

Von den weiteren Unterabschnitten des Abschnitts 2 ist lediglich der Inhalt des Unterabschnitts 225 unmittelbar aus der Literatur übernommen. Der Abschnitt 224 über Gewerbesteuer zeigt, daß selbst die Einbeziehung der dort angegebenen, vereinfachten Formulierung in ein Entscheidungsmodell die Lösungsschwierigkeit erhöhen wird, da der Sachverhalt nicht-linear ist. Entscheidungsabhängige Sortenwechselkosten (Abschnitt 223) wird man im Gesamtmodell bestenfalls mit Hilfe stark vereinfachender Annahmen berücksichtigen können. Trotz gegebener Nachfrage- und damit Produktionsmengen ist der Kapazitätsbedarf von nur ganzzahlig variierbaren Faktoren variabel. Zu diesem Sachverhalt wird im Abschnitt 222 eine Modellierung versucht.

Trotz der obigen, engen Problemstellung ist die Spanne zwischen den Formulierungen des 2. Abschnittes und einem operationalen Entscheidungsmodell für einen konkreten Fall groß. Die praktische Brauchbarkeit eines Entscheidungsmodells hängt davon ab, inwieweit es gelingt

1. den für das gestellte Entscheidungsproblem relevanten Ausschnitt der Wirklichkeit möglichst exakt zu erfassen und
2. es operational zu gestalten, d.h. so zu gestalten, daß es mit vertretbarem Aufwand an Zeit und Kosten im Hinblick auf günstige Alternativen ausgewertet werden kann.

Der umfangreiche Abschnitt 4 hat die Aufgabe, die wesent-

lichen Oberlegungen darzustellen, die notwendig sind, um zu einem im obigen Sinne "operationalen" Modell zu gelangen. Dabei sollen die engen Wechselbeziehungen zwischen Modellierung, Datenbeschaffung und Modellauswertung deutlich werden. Weitgehend intuitiv muß der Kompromiß zwischen Modellgenauigkeit und dem Aufwand bei Datenbeschaffung und Modellauswertung gefunden werden.

Bereits die Entscheidung darüber, welche Sachverhalte in das Entscheidungsmodell aufgenommen bzw. in welchem Detail aufgenommene Sachverhalte beschrieben werden sollten, ist nur anhand von Daten zu treffen. Deshalb werden im Abschnitt 5 die Probleme der Datenbeschaffung (für den konkreten Fall) zumindest insoweit beschrieben, daß die Art und der Aufwand der Datenerhebung und -aufbereitung abgeschätzt werden kann.

Der 6. Abschnitt behandelt die Modellauswertung. Das für den Fall formulierte, gemischt-ganzzahlige Modell kann wegen seines großen Umfangs nicht direkt optimiert werden. Bereits der Rechenzeitaufwand zur Optimierung des linearen Modellteils, d.h. zur Optimierung des Modells für eine bereits festgelegte Produktionsausstattung der Werke, ist groß. (Eine Produktionsausstattung ist gekennzeichnet durch eine bestimmte Kombination von 0-1 Variablen.) Zur Ermittlung kostengünstiger Kombinationen der 0-1 Variablen wurde daher ein Grobmodell entwickelt. Die wesentlichen Gesichtspunkte dabei waren:

1. Das Grobmodell soll Angaben liefern über günstige Kombinationen der ganzzahligen Variablen. Alle übrigen Angaben können anschließend exakter aus dem ursprünglichen Modell gewonnen werden. Da der lineare Transportteil des ursprünglichen Modells am aufwendigsten ist, sollte insbesondere die detaillierte Erfassung der Distributionsgesichtspunkte umgangen werden.
2. Trotzdem müssen aber die minimalen Gesamtkosten des ursprünglichen Modells für alternative Kombinationen der 0-1 Variablen (bei simultaner Optimierung des Di-

stributionsteils des ursprünglichen Modells) möglichst exakt wiedergegeben werden.

3. Die Datenumorganisation, die notwendig ist, um von Daten des ursprünglichen Modells zu Daten des Grobmodells zu gelangen, sollte sich in Grenzen halten.

Unter Nutzung der speziellen Struktur des Falles (2 Werke) wurden die Distributionskosten der 8 Absatzprodukte als nicht-lineare, separable Funktionen der Produktionsmengen in einem der beiden Werke erfaßt. Der Funktionsverlauf für das einzelne Absatzprodukt konnte durch mehrfache Optimierung eines aus dem ursprünglichen Modell entsprechend herausgezogenen Teilmodells für alternative Produktionsmengenverteilungen des Absatzproduktes auf beide Werke ermittelt werden. Der Rechenzeitverbrauch zur Optimierung dieser linearen Teilprobleme ist gering.[1)]

Um den Aufwand zur Datenumorganisation klein zu halten, wurde die übrige Struktur des ursprünglichen Modells exakt beibehalten. Alle Vergleiche beider Modelle bewiesen eine gute Obereinstimmung. Das Optimum des linearen Teils des Grobmodells läßt sich in 1/75 der Zeit, die die Optimierung des ursprünglichen Modells erfordert, bestimmen.

Mit dem zur Verfügung stehenden Programmmaterial zur gemischt-ganzzahligen Optimierung gelang die Optimierung des Grobmodells nicht mit wünschenswerter Genauigkeit. Immerhin erlaubte aber der geringe Rechenzeitaufwand zur Optimierung des linearen Teils des Grobmodells eine ungefähre Erfassung des durch alternative Kombinationen der ganzzahligen Variablen bestimmten zulässigen Lösungsbereichs. Günstige Grobmodellalternativen wurden mit Hilfe des ursprünglichen Modells im Hinblick auf Produktions und Distributionskosten genauer spezifiziert.

---

1) Für 70 Probleme rund 50 Sekunden CPU-Zeit bei Anwendung des Programms MPS/360 auf dem Rechner IBM 360/91

Die Arbeit schließt mit einer Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse durch Parametrisierung wichtiger Datengruppen und der anschließenden Interpretation der Ergebnisse der Fallstudie, insbesondere im Hinblick auf die einschränkenden Modellannahmen.

LITERATURVERZEICHNIS

A. Bücher

Ackoff, L.A., Rivelt, P.R., Industrielle Unternehmensforschung, Wien, München, 1966

Adam, Dietrich, Produktionsplanung bei Sortenfertigung Gabler, Wiesbaden, 1969

Biddlingmaier, J., Unternehmensziele und Unternehmensstrategien, Wiesbaden, 1964

Dantzig, G.B., Linear Programming and Extensions, 2. Aufl., Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1963, Deutsche Ausgabe: Lineare Programmierung und Erweiterungen, übersetzt von Jaeger, A., Springer, Berlin-Heidelber-New York, 1966

Dinkelbach, W., Sensitivitätsanalysen und parametrische Programmierung, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1969

Driebeck, N.J., Applied Linear Programming, Reading Massachusetts, usw., 1969

Gutenberg, E., Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, 1. Band: Die Produktion, 14. Auflage, Berlin, usw., 1968

Grundmann, W., und andere Mathematische Methoden zur Standortbestimmung, Berlin, 1967

Hadley, G., Linear Programming, Reading, Massachusetts, usw., 1962

Hadley, G., Nonlinear and Dynamic Programming, Reading, Massachusetts, usw., 1964

Hamman, P., Einige Obertragungen des Transportmodelltyps auf Produktionssektormodelle, Diss., München, 1965

Hanssmann, F., Operations Research Techniques for Capital Investment, New York, London, Sidney, 1968

Hanssmann, F., Operations Research in Production and Inventary Control, New York, London, 1962

Heinen, E., Das Zielsystem der Unternehmung – Grundlagen betriebswirtschaftlicher Entscheidungen, Wiesbaden, 1966

Judin, D.B., Goldstein, E.G., Lineare Optimierung I, Herausgeber in dtsch. Sprache: Dück, W., Berlin, 1968

Kotler, P., Marketing Management, Englewood Cliffs, New Jersey, 1967

Magee, J.F., Industrial Logistics, New York, usw., 1968

Müller-Merbach, H., On Round-off Errors in Linear Programming, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1970

Nieschlag, Dichtl, Hörschgen, Einführung in die Lehre von der Absatzwirtschaft, Berlin, 1968

Holtemeier, H., Sensitivitätsanalyse bei diskreten linearen Optimierungsproblemen, Berlin-Heidelberg-New York,

Wöhe, G., Betriebswirtschaftliche Steuerlehre, Band II, 2. Aufl., Berlin, Frankfurt, 1965

B. Beiträge in Zeitschriften und Sammelwerken

Adam, D., Simultane Ablauf- und Programmplanung bei Sortenfertigung mit ganzzahliger linearer Programmierung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 1963, S.233-245

Atkins, R.J., Shriver, R.H., New Approach to Facilities Location, in: Harvard Business Review, Vol. 46, No.3, 1968, S.70-79

Culhane, J.H., Ronaldson, A.M., Zimmerman, R.M., A Dynamic Approach to Capital Investment - A Case Study in: Proceedings of the Fourth International Conference on Operational Research, Hrsg. HERTZ,D.B., MELESE,J., New York usw., S.551-559

Davis, P.S., Ray, T.L., A Branch-Bound Algorithm for the Capacitated Facilities Location Problem, in: Naval Research Logistics Quarterly, Vol.16, No.3, 1969, S.331-344

Efroymson, M.A., Ray, T.L., A Branch-Bound Algorithm for Plant Location, in: Operations Research, Vol.14, No.3, 1966, S.361-368

Feldman, E., Lehrer, F.A., Ray, T.L., Warehouse Location under Continuous Economies of Scale, in: Management Science, Vol.12, No.9, 1966, S.670-684

Graciano, S., Branch - and - Bound and Approximate Solutions to the Capacitated Plant - Location Problem, in: Operations Research, Vol.17, No.6, 1969, S.1005-1016

Gupta, S.K., Rosenhead, J., Robustness in Sequential Investment Decisions, in: Management Science, Vol.15, No.2, Oktober 1969, S.18-29

Hespos, D.B., Strassmann, P.A., Stochastic Decision Trees for the Analysis of Investment Decisions, in: Management Science, Vol.11, No.10, August 1965, S.244-259

Knödel, W., Ein verallgemeinertes Transportproblem, in: Unternehmungsforschung, Band 4, Heft 1, 1960, S.1-12

Kuehn, A., Hamburger, M.J. A Heuristic Program for Locating Warehouses, in: Management Science, Vol.9, No.4, 1963, S.643-666

Mitten, L.G., Branch and Bound Methods, in: General Formulation and Properties, in: Operations Research, Vol.18, No.1, 1970, p.24-34

Müller-Merbach, H., Die Methode der "direkten Koeffizientenanpassung" (μ-Form) des Separable Programming, in: Unternehmensforschung, Band 14, Heft 3, 1970, S.197-214

Müller-Merbach, H., Modelle der Standortbestimmung, in: Handwörterbuch des Rechnungswesens, Stuttgart, 1970, Sp. 1160 ff.

Shycon, H.N., Maffei, R.B. Simulation-Tool for Better Distribution, in: Harvard Business Review, Vol.38, No.6, 1960, S.65-75

Shycon, H.N., Maffei, R.B., Remarks on the Kuehn-Hamburger Paper, in: Management Science Vol.9, No. 4, 1963, S.667,668

Spielberg, K., Algorithms for the Simple Plant Location Problem with Some Side Conditions, in: Operations Research, Vol.17, No.1, 1969, S.85-111

Strobel, W., Simultane Losgrößenbestimmung bei stationären Modellen, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 1964, S.241-267

White, C.H., Production Allocation with set-up Penalities and Concave Material Costs, in: Operations Research, Vol.17, No.6, 1969, S.958-972

C.BESCHREIBUNGEN VON RECHENPROGRAMMEN

Informationen für die Landwirtschaftsberatung in Baden-Württemberg, LT Brief No.2, September 1968, Hrsg.: Landesanstalt für die Anpassung der Landwirtschaft mit Landesstelle für landwirtschaftliche Marktkunde, Donaueschingen

International Business Machines Corp. (IBM)
Branch and Bound Mixed Integer Programming (BBMIP) Form Nr. 360 D / 15.2.005

International Business Machines Corp. (IBM)
Mathematical Programming System / 360, Application Description, Form Nr. H20-0136-3

Lebenslauf

Als Sohn des kaufmännischen Angestellten Alfred Fischer und seiner Ehefrau Anna, geb. Feige, wurde ich am 16.Januar 1943 in Waldenburg (Schlesien) geboren.

Nach vier Jahren Volksschule in Offenbach am Main trat ich 1953 in das Rudolf-Koch-Realgymnasium in Offenbach ein, an dem ich im Frühjahr 1962 die Reifeprüfung ablegte.

Daran schloß sich von April 1962 bis März 1964 eine Ausbildung zum Reserveoffizier bei der Bundeswehr an.

Zum Sommersemester 1964 immatrikulierte ich mich an der Universität Frankfurt für das Fach Betriebswirtschaftslehre. Nach dem 5. Semester in Frankfurt studierte ich 2 Trimester an der Universität in Bristol (England). Mit dem Sommersemester 1967 setzte ich das Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Universität München fort und schloß es im Herbst 1969 mit der Diplomprüfung für Kaufleute ab.

Seit dem Jahresanfang 1970 bin ich als Verwalter einer wissenschaftlichen Assistentenstelle bei Herrn Prof. Dr. F. Hanssmann am Institut für Unternehmens- und Verfahrensforschung der Universität München tätig.